GEO-ENGINEERING

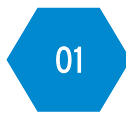
wirksamer Klimaschutz oder Größenwahn?



Umwelt
Bundes
Amt
Für Mensch und Umwelt

GEO-ENGINEERING
wirksamer Klimaschutz oder Größenwahn?

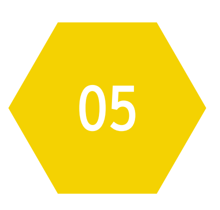
Methoden - Rechtliche Rahmenbedingungen - Umweltpolitische Forderungen

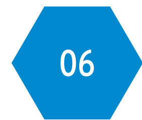




03









01

EINLEITUNG

Klimaschutzstrategien folgen heute im Wesentlichen zwei Ansätzen. Erstens sollen Maßnahmen ergriffen werden, um durch den Menschen verursachte Treibhausgasemissionen zu vermindern. Zweitens sollen Maßnahmen, die dazu beitragen, dass sich Mensch und Umwelt an unvermeidbare Klimaänderungen anpassen können, durchgeführt werden. Seit einiger Zeit werden darüber hinaus in Literatur und Medien verstärkt Vorschläge diskutiert, dem Klimawandel durch großtechnische Eingriffe in die globalen ökologischen Abläufe entgegen zu wirken. Diese Maßnahmetypen werden unter dem Begriff Geo-Engineering zusammengefasst.

Was ist Geo-Engineering?

Geo-Engineering umfasst bewusste und zielgerichtete – meist in großem Maßstab durchgeführte – Eingriffe in das Klimasystem mit dem Ziel, die anthropogene Klimaerwärmung abzumildern (Royal Society 2009). Dem IPCC[1] zufolge sind unter Geo-Engineering technologische Maßnahmen zu verstehen, die darauf abzielen, das Klimasystem zu stabilisieren, indem sie direkt in die Energiebilanz der Erde eingreifen. Das Ziel besteht darin, die globale Erwärmung zu verringern (IPCC 2007 b, WG III). Die Ideen sind zahlreich und vielfältig. Im Wesentlichen können bei den Maßnahmen des Geo-Engineering zwei Kategorien unterschieden werden:

(1) Maßnahmen, die den Strahlungshaushalt beeinflussen (engl.: Solar Radiation Management, SRM): Sie sollen die Nettoeinstrahlung kurzwelliger Sonnenstrahlen verringern und so die Atmosphäre in Bodennähe abkühlen. Diese Maßnahmen wirken also nicht den Ursachen der Klimaerwärmung entgegen, da sie nicht die erhöhten Treibhausgaskonzentrationen vermindern (vgl. Kapitel 3.1).

(2) Die zweite Kategorie umfasst Technologien, die darauf abzielen, dem atmosphärischen Kohlenstoffkreislauf Kohlendioxid zu entziehen und dauerhaft zu speichern (engl.: Carbon Dioxide Removal, CDR). Diese Technologien sollen zwar die Konzentration des Treibhausgases CO_2 in der Atmosphäre beeinflussen, die Menge der anthropogen erzeugten Treibhausgase wird aber nicht verändert (vgl. Kapitel 3.2).

Alle Geo-Engineering-Maßnahmen haben eines gemeinsam: Sie gehen von der Möglichkeit aus, dass sich die globale Erwärmung mit großtechnischen Lösungen rückgängig machen oder verringern lässt. Geo-Engineering setzt daher nicht an den Ursachen des anthropogenen Treibhauseffektes an. Vielmehr sollen nur die Auswirkungen beeinflusst und gemindert werden.

Im Unterschied zum klassischen Klimaschutz werden beim Geo-Engineering die Emissionen der Treibhausgase nicht reduziert. Da es sich bei den meisten der vorgeschlagenen Maßnahmen um großräumige technische Eingriffe in das sehr komplexe Klimasystem der

Erde handelt, sind die Folgen schwer einzuschätzen. Dennoch gibt es in einigen Ländern, beispielsweise in den USA und Großbritannien, ernsthafte Bestrebungen, solche Ideen praktisch umzusetzen. In Deutschland unterstützte das BMBF[2] Forschungsvorhaben im Bereich des marinen Geo-Engineering (unter anderem EisenEx 2000, LOHAFEX 2009); allerdings erklären BMBF und BMU zu diesen Vorhaben übereinstimmend, dass sie in der großtechnischen Eisendüngung von Meeresgebieten keinen sinnvollen Klimaschutz sehen.

Die grundsätzliche Haltung zum Geo-Engineering wird auch von den vorherrschenden tradierten Vorstellungen der verschiedenen Gesellschaften bestimmt. Sie hängt insbesondere vom Mensch-Natur-Verhältnis und von dem Maß der Technikorientierung und -gläubigkeit ab. Während man in vielen Ländern Europas den Versuch, dass der Mensch die globale Umwelt steuert, eher als Anmaßung und als Hybris empfindet, diskutieren stärker technikorientierte Gesellschaften Vorschläge zum Geo-Engineering weniger skeptisch. Dort konzentriert sich die Debatte im Wesentlichen darauf, ob und wie die Konzepte sich technisch und ökonomisch umsetzen lassen.

Um zu entscheiden, inwieweit Geo-Engineering als wirksame Maßnahme gegen eine globale Erwärmung in Betracht gezogen werden sollte, müssen viele Fragen geklärt werden, die aber zu großen Teilen derzeit noch nicht beantwortet werden können. Die Fragen betreffen unter anderem: Die Wirksamkeit und den Entwicklungsstand der einzelnen Maßnahmen, die Risiken, die Abwägung von Kosten und Nutzen sowie die gesellschaftliche Akzeptanz einschließlich der rechtlichen Kontrolle. Eine Auseinandersetzung mit diesen Fragen ist aber dringend erforderlich, um wissenschaftlich begründet zu entscheiden, ob und inwieweit im Rahmen einer nachhaltigen Entwicklung solche Vorschläge tatsächlich geeignet sind, einen wirksamen Beitrag im Klimaschutz zu leisten und ob insbesondere die Risiken der Maßnahmen zu verantworten sind.

Das Umweltbundesamt (UBA) hat als wissenschaftliche Umweltbehörde unter anderem die Aufgabe, politische Entscheidungsträger hinsichtlich geeigneter Konzepte einer nachhaltigen Klimapolitik zu beraten. Neue Konzepte für Klimaschutzmaßnahmen werden deshalb vom Umweltbundesamt dahingehend überprüft, ob sie den Anforderungen einer nachhaltigen Klimapolitik genügen.



Das Foto von 1966 zeigt Mitarbeiter des Projektes Stormfury, das die Abschwächung tropischer Wirbelstürme mit Hilfe von Silberjodid zum Ziel hatte. Das Projekt führte nicht zum gewünschten Ergebnis.

HISTORISCHE BEISPIELE FÜR GEO-ENGINEERING

Die Idee des Geo-Engineering ist nicht neu. Bereits im vergangenen Jahrhundert wurden Geo-Engineering-Maßnahmen in verschiedenen Zusammenhängen vorgeschlagen. So diskutierten Wissenschaftler, durch Geo-Engineering-Maßnahmen die Erde in bis dahin für den Menschen nicht nutzbaren Regionen urbar zu machen. In Russland sollten zum Beispiel ganze Flüsse umgeleitet werden, um damit die mittelasiatischen Steppen zu bewässern. Die Sibirische Tundra sollte mit Hilfe eines Dammes durch die Beringstraße oder der Ausbringung von Russpartikeln aufgetaut werden.

In den 1950er bis 1970er Jahren des vergangenen Jahrhunderts in der Hochzeit des Kalten Krieges wurden Geo-Engineering-Maßnahmen sogar für militärische Zwecke erwogen. Die militärische Forschung dachte an neue Methoden der Kriegsführung. So veröffentlichte 1955 der Mathematiker John von Neumann einen Artikel in der Zeitschrift „Fortune", in der er Methoden der „klimatischen Kriegsführung" aufzeigte. Durch Geo-Engineering-Maßnahmen sollte das Wetter für militärische Zwecke beeinflusst werden und u. a. Eisflächen zum Schmelzen gebracht werden.

All diese Vorschläge verblieben – glücklicherweise – im Bereich der Theorie. Schon damals wurden vor allem die Wirkung der jeweiligen Maßnahme und die technische Machbarkeit diskutiert. Mögliche Bedenken hinsichtlich der Realisierbarkeit, aber auch hinsichtlich unbeabsichtigter Nebenwirkungen auf den Menschen und die Umwelt wurden kaum thematisiert.

Geo-Engineering darf Vorsorgeprinzip nicht übergehen

Zu den Grundpfeilern der Umweltpolitik gehört das Vorsorgeprinzip. Es zielt darauf ab, bei unvollständigem Wissen über Art, Ausmaß und Eintrittswahrscheinlichkeit von Umweltschäden vorbeugend zu handeln, um Schäden und Störungen von vornherein zu vermeiden. Maßnahmen zum Geo-Engineering müssen sich auch am Vorsorgeprinzip messen.

Die natürlichen Systeme – zu denen das Klimasystem zählt – sind äußerst komplex und durch eine nichtlineare Dynamik ihrer Prozesse gekennzeichnet. Die Einwirkung des Menschen auf diese Systeme und die Wechselwirkung des Klimasystems mit anderen Prozessen des Erdsystems sind nicht ausreichend bekannt. Weder haben wir vollständige und historisch weit zurückreichende Daten über den Umweltzustand, noch haben wir Modelle, die alle Facetten dieser nichtlinearen Dynamik beschreiben. Die Wirkungen von Maßnahmen, die an einer Stelle auf Geoprozesse zielen, sind daher wegen erheblicher Wissensdefizite und Unsicherheiten kaum abschätzbar. Angesichts der Tragweite von Geo-Engineering-Maßnahmen und den großen Unsicherheiten bei der Abschätzung von Folgen im komplexen Erdsystem rät das UBA aus Vorsorgegründen zu größter Zurückhaltung und bis zu einer deutlichen Verbesserung des Wissens um die Interdependenzen zwischen Geoprozessen zu einem Moratorium für den Einsatz solcher Maßnahmen.

Überblick

Mit diesem Hintergrundpapier gibt das Umweltbundesamt einen Überblick über die wichtigsten Vorschläge des Geo-Engineering, die derzeit in der Literatur diskutiert werden. Kapitel 2 ordnet diesen konzeptionellen Ansatz in die Klimapolitik ein. Kapitel 3 stellt anschließend die einzelnen Methoden des Geo-Engineering im Detail vor. Zu diesen Methoden informieren wir, soweit möglich, über Realisierbarkeit, Wirksamkeit und Einschätzungen zum Risiko für Mensch und Umwelt. Der Wissensstand zu den einzelnen Vorschlägen ist recht unterschiedlich. Geo-Engineering Vorschläge, für die bereits differenziertere Erkenntnisse vorliegen, werden auf der Basis des gegenwärtigen Wissensstandes analysiert und bewertet. Anschließend stellt Kapitel 4 die geltenden Regeln des internationalen Rechts im Überblick vor. In Kapitel 5 erläutern wir die Kriterien, die politische Entscheidungsträger berücksichtigen sollten, falls sie tatsächlich beabsichtigen, Geo-Engineering Maßnahmen umzusetzen. Das abschließende Kapitel 6 gibt einen Ausblick und spricht erste Empfehlungen für den Umgang mit dem umstrittenen und in vielen Fragen noch offenen Thema Geo-Engineering aus.

FUSSNOTEN:

1 IPCC = Intergovernmental Panel on Climate Change (Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen)

2 BMBF = Bundesministerium für Bildung und Forschung

WEITERFÜHRENDE LITERATUR

Dieses Hintergrundpapier stützt sich bei der Beschreibung der Geo-Engineering-Vorschläge im Wesentlichen auf folgende Veröffentlichungen:

- Geo-Engineering the Climate (Royal Society 2009),
- Ozeandüngung zur Bekämpfung des Klimawandels – Positionspapier (Umweltbundesamt 2010)
- CCS – Rahmenbedingungen des Umweltschutzes für eine sich entwickelnde Technik (Umweltbundesamt 2009a)

Wichtiges Grundlagenwissen zum Thema Klimawandel findet sich kurzgefasst in:

- Klimaänderung – Wichtige Erkenntnisse aus dem 4. Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen der Vereinten Nationen (IPCC) (Umweltbundesamt 2009b)

02

WELCHE ROLLE SPIELT DAS GEO-ENGINEERING IM KLIMASCHUTZ?

Ziel der Klimaschutzpolitik ist es, die Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre auf einem Niveau zu stabilisieren, das eine gefährliche anthropogene Störung des Klimasystems verhindert. Bereits bei einer Erhöhung der globalen Mitteltemperatur um bis zu 2° C gegenüber dem vorindustriellen Zeitraum ist mit Schäden der natürlichen, biologischen aber auch gesellschaftlichen Systeme zu rechnen. Bei einer Erwärmung über 2° C sind schwerwiegende und irreversible Schädigungen zu erwarten (UBA, 2009c). Daher muss in jedem Fall verhindert werden, dass sich die globale Mitteltemperatur um mehr als 2° C erhöht.



KOHLENDIOXID: ANTHROPOGENE EMISSIONEN UND ATMOSPHÄRISCHE KONZENTRATION

Die Energieerzeugung durch die Menschen verursachte 2008 einen Ausstoß des Treibhausgases Kohlendioxid von weltweit etwa 30 Gt CO_2 (entspricht 8,2 Gt C) (IEA 2010). Im gleichen Jahr betrugen die energiebedingten Emissionen in Deutschland etwa 0,8 Gt CO_2 (IEA 2010).

Die CO_2-Konzentration in der Erdatmosphäre ist seit 1750 um etwa 36 % gestiegen. Die gegenwärtige CO_2-Konzentration wurde in den vergangenen 650 000 Jahren (180-300 ppm) und wahrscheinlich auch in den letzten 20 Mio. Jahren nicht erreicht. Die derzeitige jährliche Anstiegsrate ist die höchste der letzten 20 000 Jahre. Etwa 65 % der anthropogenen Emissionen seit 1750 sind auf die Verbrennung fossiler Brennstoffe zurückzuführen.

Die Konzentrationszunahme der Dekade 1996 – 2005 hat sich gegenüber vorangegangenen Dekaden deutlich erhöht. Während die mittlere Wachstumsrate im Zeitraum 1960 – 2005 noch 1,4 ppm/Jahr betrug, erreichte sie in der genannten Dekade 1,9 ppm/Jahr. Seit 1958 ist dieser Trend durch regelmäßige Messungen auf dem Mauna Loa auf Hawaii belegt.





GIBT ES WEGE, DIE GLOBALE ERWÄRMUNG UM MEHR ALS 2°C ZU VERHINDERN?

Um das 2° C-Ziel mit einer Wahrscheinlichkeit von 75 % einzuhalten, dürfen die kumulierten CO_2-Emissionen – auch als globales CO_2-Budget bezeichnet – von 2000 bis 2049 global insgesamt 1000 Gt CO_2 nicht überschreiten (Meinshausen et al. 2009). Allein zwischen 2000 und 2006 wurden bereits 234 Gt CO_2 emittiert. Schafft es die Menschheit, den Anstieg der jährlichen, globalen Treibhausgasemissionen spätestens im Zeitraum 2015 bis 2020 zu stoppen und anschließend bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts mindestens auf die Hälfte der Emissionen des Jahres 1990 zurückzuführen, kann das globale CO_2-Budget eingehalten werden. Nach dem Prinzip der gemeinsamen, geteilten Verantwortung ergibt sich daraus für die Industrieländer die Verpflichtung, ihre Emissionen bis 2050 um 80-95 % gegenüber 1990 zu senken.

In zahlreichen Studien wurden nationale, internationale und globale Szenarien entwickelt, wie durch das Zusammenwirken von Minderungsmaßnahmen die Klimaschutzziele auf allen Ebenen eingehalten werden können (u. a. IPCC 2007b, IEA 2009: Blue Map Scenario im WEO 2009, GP EREC 2010: Energy (R)Evolution, 2010, ECF 2010: Roadmap 2050, WWF 2009: Modell Deutschland).

Das Umweltbundesamt hat 2009 in seiner Konzeption zur Klimapolitik für Deutschland vorgestellt, wie die weiteren Schritte einer ambitionierten Energie-, Klimaschutz- und Klimaanpassungspolitik gestaltet sein sollten. Darüber hinaus hat das Umweltbundesamt in seiner 2010 veröffentlichten Studie „Energieziel 2050: 100 Prozent Strom aus erneuerbaren Quellen" gezeigt, wie die Stromversorgung in Deutschland bis 2050 vollständig auf erneuerbare Energien umgestellt werden kann und damit eine Vorrausetzung für die langfristig notwendigen, radikalen Emissionsminderungen bis hin zum Treibhausgasneutralen Deutschland geschaffen wird.

Um das 2° C-Ziel einzuhalten, ist ein aktiver und wirksamer Klimaschutz erforderlich. Vor allem sind erhebliche Anstrengungen zur drastischen Verminderung der Treibhausgasemissionen notwendig (siehe Kasten „Gibt es Wege, die globale Erwärmung um mehr als 2° C zu verhindern?"). Trotz der Einigkeit über das 2° C-Ziel stellen wir fest, dass die Minderungsverpflichtungen nicht genügen und die Minderungsmaßnahmen bislang nicht in ausreichendem Maße durchgeführt werden. Hier ist zu berücksichtigen, dass ein erfolgreicher Klimaschutz sich aus einer Vielzahl von Einzelmaßnahmen zur Minderung der Treibhausgasemissionen zusammensetzen muss. Notwendig sind des Weiteren ein Umbau unserer bisherigen emissionsintensiven Wirtschaftsweise sowie ein gemeinsames Handeln auf globaler Ebene.

Verfechter des Geo-Engineering hingegen versuchen vor allem politischen Entscheidungsträgern einen Weg anzubieten, der es ermöglichen soll, die globale Erwärmung zu beschränken, ohne Maßnahmen zur Minderung der Treibhausgasemissionen, die oftmals mit Verhaltensänderungen der Bevölkerung verbunden und daher politisch streitig sind, ergreifen zu müssen. Die Befürworter des Geo-Engineering hoffen, auf diese Weise die Bekämpfung der globalen Erwärmung einfacher, kostengünstiger und auch schneller zu erreichen.

Weiter wird argumentiert, dass Geo-Engineering als zusätzlicher und gleichsam letzter Rettungsschirm vor der globalen Erwärmung genutzt werden soll. Ein solcher Fall würde vorliegen, wenn die Bemühungen, die Treibhausgasemissionen global im notwendigen Ausmaß zu mindern, scheitern. Mit zunehmender Erwärmung des Klimas wächst die Gefahr, dass sogenannte Kipp-Punkte eintreten, die mit besonders starken oder abrupten Klimaänderungen verbunden sind. Auch um das Erreichen derartiger Kipp-Punkte zu verhindern, wird Geo-Engineering als schnell wirksame Maßnahme diskutiert. Geo-Engineering beinhaltet jedoch keine Erfolgsgarantie. Behalten wir unsere emissionsintensive Wirtschaftsstruktur bei und versuchen wir daneben die globale Erwärmung großtechnisch mit Geo-Engineering zur Beeinflussung des Strahlungshaushalts oder Festlegung von Kohlendioxid zu bekämpfen, bleibt der Treibhausgasausstoß als Treiber des Klimawandels weiter bestehen. Sollte das Geo-Engineering nicht den gewünschten Effekt haben oder nicht durchgängig aufrechterhalten werden können, würden die weiterhin ausgestoßenen Treibhausgase das Klima unvermindert verändern.

Ein weiteres Problem besteht vor allem bei den Geo-Engineering-Vorschlägen, die Maßnahmen vorsehen, die den Strahlungshaushalt beeinflussen sollen. Die dabei vorgeschlagenen Maßnahmen bieten keine Lösung für weitere Schädigungen der Umwelt, die durch erhöhte Treibhausgaskonzentrationen hervorgerufen werden. Dazu zählt zum Beispiel die Versauerung der Ozeane.

Außerdem würden die positiven Synergieeffekte von klassischen Klimaschutzmaßnahmen entfallen, die neben Treibhausgasminderungen auch der Ressourcenschonung dienen und somit eine nachhaltige Entwicklung unterstützen und gesamtwirtschaftlich positiv wirken.

Schließlich und vor allem würde die Ursachenbekämpfung verschoben, wenn Geo-Engineering alternativ zur notwendigen Minderung der Treibhausgase betrieben würde. Nachfolgenden Generationen würde dadurch die Last der noch unbekannten Folgewirkungen aufgebürdet.

Mit Geo-Engineering droht ein Paradigmenwechsel

Geo-Engineering erhöht demnach nicht zwangsläufig die Wahrscheinlichkeit, den gefährlichen Klimawandel zu verhindern, indem es eine weitere (Notfall) Option zur Bekämpfung der globalen Erwärmung bietet. Im Gegenteil, durch Geo-Engineering droht ein Paradigmenwechsel in der Klimaschutzpolitik, der die bisherige Einigkeit, dass Minderungsmaßnahmen in erheblichem Ausmaß erforderlich sind, in Frage stellt. Denn es besteht die Gefahr, dass die Bekämpfung der Ursachen, also die Treibhausgasminderung, vernachlässigt wird, weil vermeintliche „Rettungsschirme" zur Verfügung stehen.

Die Idee des Geo-Engineering scheint auch deshalb stärker im Aufwind begriffen zu sein, weil die Verhandlungen unter dem Dach der UN-Klimarahmenkonvention (UNFCCC[3]) über ein neues weltweites Klimaschutzabkommen ab 2013 noch andauern. Geo-Engineering-Maßnahmen könnten auch unilateral von einzelnen Staaten vollzogen werden. Diese Maßnahmen können aber erhebliches Konfliktpotential innerhalb der Staatengemeinschaft verursachen, weil Geo-Engineering für Mensch und Umwelt regional sehr unterschiedliche Risiken verursachen kann. Weitere Diskussionen über Geo-Engineering müssen deshalb darauf bedacht sein, die Bemühungen des klassischen Klimaschutzes um internationale Abkommen und die Motivation jedes Einzelnen zur Vermeidung der Treibhausgasemissionen nicht zu beeinträchtigen.

FUSSNOTEN:

3 UNFCCC = United Nations Framework Convention on Climate Change, (Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen)



03

GEO-ENGINEERING – WELCHE VORSCHLÄGE KURSIEREN?

Die wichtigsten, derzeit in der Literatur beschriebenen Vorschläge zum Geo-Engineering und deren Zuordnung zu den jeweiligen Kategorien sind in Abbildung 1 dargestellt. In den nachfolgenden Abschnitten 3.1 bis 3.2 werden die einzelnen Methoden näher beleuchtet. Der in der Literatur beschriebene aktuelle Wissensstand zu den einzelnen Methoden weist jedoch große Unterschiede auf. Einige Methoden sind lediglich als erste Ideen einzustufen, für welche die theoretischen Wirkungszusammenhänge wenig durchdacht und kaum oder gar nicht erforscht sind. Für andere Methoden sind die Erkenntnisse aus Publikationen und Forschungsergebnissen bereits detaillierter, so dass für diese schon eine erste Analyse und Bewertung vorgenommen werden konnte. Der geschilderte ungleiche Wissensstand zu den verschiedenen Vorschlägen spiegelt sich demzufolge auch in den nachfolgenden Abschnitten des vorliegenden Hintergrundpapiers wider.



GEO-ENGINEERING

BEEINFLUSSUNG DES STRAHLUNGSHAUSHALTS

- **Änderung der Oberflächenalbedo**
  - Weißen von Dächern und Aufhellung von Ansiedlungen
  - Reflektivere Feldfrucht- und Grünlandsorten
  - Wüstenreflektoren
  - Änderung der Albedo ozeanischer Flächen
- **Ausbringung von Aerosolen in der Stratosphäre**
  - Sulfataerosole
  - Reflektierende metallische Partikel oder Kleinstballons
- **Erhöhung der Albedo von Wolken**
- **Installationen im Weltraum**
  - Spiegelnde Scheiben im erdnahen Orbit
  - Zonen aus Staubpartikeln in Erdnähe
  - Ultradünnes Geflecht aus Aluminiumfäden zwischen Erde und Sonne
  - Riesenspiegel zwischen Erde und Sonne
  - Schwarm aus reflektierenden Scheiben zwischen Erde und Sonne

BINDUNG VON KOHLENDIOXID

- **Terrestrisch**
  - Abscheidung und Speicherung von CO_2 (CCS), CO_2-Filterung aus der Luft
  - Methoden auf Basis von Biokohle und Biomasse, BE-CCS
  - Nutzung der Prozesse bei Verwitterung
  - Aufforstung*
- **Marin**
  - Ozeandüngung
  - Manipulation der marinen Schichtung
  - Ozeankalkung
  - Versenkung von Ernteabfällen
  - Nutzung der Prozesse bei Verwitterung

ABB 1:
SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER IN DIESEM HINTERGRUNDPAPIER ERLÄUTERTEN VORSCHLÄGE UND METHODEN ZUM GEO-ENGINEERING

* Aufforstungen werden vom Umweltbundesamt nicht als Geo-Engineering-Maßnahmen angesehen.
Zu möglichen negativen Auswirkungen von Aufforstungen wird das UBA ein eigenes Papier entwickeln.

Vorschläge zur Beeinflussung des Strahlungshaushalts

Motor des Klimas der Erde ist die Strahlung der Sonne. Ein Teil der Sonnenstrahlung, die auf der Erde ankommt, wird durch Wolken, Bestandteile der Luft und die Erdoberfläche reflektiert. Ein weiterer Teil wird an der Erdoberfläche und in der Atmosphäre in Wärmestrahlung umgesetzt, die teilweise wieder an den Weltraum abgegeben wird. Aufgrund der Energieerhaltung ist das Verhältnis zwischen ankommender und abgehender Strahlung ausgeglichen: Die ankommende Sonnenstrahlung abzüglich des reflektierten Anteils der Sonnenstrahlung ist gleich der von der Erde in den Weltraum abgegebenen Wärmestrahlung.

Wird diese Energiebilanz durch bestimmte Faktoren gestört, ändert sich das Klima. Wenn zum Beispiel der Anteil von Treibhausgasen in der Atmosphäre wächst, verringert sich zunächst die in den Weltraum abgegebene Wärmestrahlung, weil die Treibhausgase einen Teil dieser Strahlung in der Atmosphäre zurück halten: Das System Erdoberfläche/Atmosphäre erwärmt sich. Dies führt in der Folge auch dazu, dass vermehrt Wärmestrahlung in den Weltraum abgegeben wird. Das System erwärmt sich nun so lange, bis die abgegebene Wärmestrahlung die ankommende Sonnenstrahlung ausgleicht und sich ein neuer Gleichgewichtszustand einstellt. Ein anderes Beispiel: Steigt der reflektierte Anteil der Sonnenstrahlung – die Albedo – sinkt die Temperatur und die in den Weltraum abgegebene Wärmestrahlung verringert sich.

Das grundlegende Prinzip lautet: Ändert sich die beschriebene Energiebilanz, ändert sich auch das globale Klima der Erde. Folgende Prozesse beeinflussen hauptsächlich die Energiebilanz:

- Änderungen der ankommenden Solarstrahlung durch Änderungen der Erdumlaufbahn um die Sonne oder durch veränderte Sonnenaktivität;
- Änderungen der reflektierten Solarstrahlung, beispielsweise durch Veränderungen der Schnee- und Eisbedeckung der Erdoberfläche;
- Änderungen der in den Weltraum abgegebenen Wärmestrahlung, beispielsweise durch Änderung des atmosphärischen Gehaltes an Treibhausgasen und Aerosolen[4]

ABB 2:

BEEINFLUSSUNG DES STRAHLUNGSHAUSHALTS

Anknüpfend an diese Prozesse gibt es eine Reihe von Geo-Engineering-Vorschlägen, mit denen der Strahlungshaushalt beeinflusst werden soll (Abb. 2) (engl.: Solar Radiation Management, SRM). Dazu zählen unter anderem die Installation von Spiegeln im Weltraum zur Verringerung der an der Erdoberfläche ankommenden Solarstrahlung oder die Erhöhung der Albedo der Erdoberfläche durch das Weißen von Dächern.

01 Weißen von Dächern und Aufhellung von Ansiedlungen

02 Reflektivere Feldfrucht- und Grünlandsorten

03 Wüstenreflektoren

04 Änderung der Albedo ozeanischer Flächen

05 Erhöhung der Albedo von Wolken

06 Stratosphärische Aerosole

07 Installationen im Weltraum



STRAHLUNGSANTRIEB

Um eine Störung der Energiebilanz des Systems Erdoberfläche/Atmosphäre zahlenmäßig ausdrücken zu können, wird der so genannte Strahlungsantrieb verwendet. Er ist ein Maß für den Einfluss, den ein Prozess – zum Beispiel ein Anstieg von Treibhausgasen in der Atmosphäre – auf die Änderung des Gleichgewichts von einfallender und abgehender Energie im System Erdoberfläche/Atmosphäre hat. Aus der Größe des Strahlungsantriebes leiten die Klimatologen ab, welche Bedeutung ein Prozess als potenzieller Antrieb einer Klimaänderung hat. Der Strahlungsantrieb wird in Watt pro Quadratmeter (W/m^2) ausgedrückt. Ein positiver Antrieb führt tendenziell zur Erwärmung, ein negativer Antrieb führt tendenziell zur Abkühlung der Erdoberfläche.

3.1.1 Vorschläge zur Änderung der Albedo von Oberflächen

Die einfallenden Sonnenstrahlen werden von Oberflächen und Körpern auf der Erde je nach Farbe und Beschaffenheit in unterschiedlichem Maße reflektiert. So haben Schnee- und Eisflächen ein höheres Rückstrahlvermögen als dunkle Flächen, wie zum Beispiel Ozeane. Das Maß für das Rückstrahlvermögen wird als Albedo bezeichnet und ist das Verhältnis der Strahlung, die von einem Objekt zurückgeworfen wird, zur Strahlung, die bei dem Objekt ankommt. Weiße Oberflächen besitzen eine hohe Albedo. Sie erwärmen sich in der Folge weniger als dunkle.

Verschiedene Vorschläge im Rahmen des Geo-Engineering machen sich genau diese Eigenschaft zunutze und zielen darauf ab, die Albedo zu erhöhen. Erhöht sich die Albedo, nimmt der in Richtung Weltraum reflektierte Anteil der Sonnenstrahlung zu, die Luft in Bodennähe kühlt sich in der Tendenz ab.

01 Weißen von Dächern und Aufhellung von menschlichen Ansiedlungen

Der Vorschlag sieht vor, Dächer, Straßen, und Gehwege weiß zu streichen, um die Albedo von Siedlungen zu erhöhen (Akbari et al. 2009). Dies wäre vor allem in sonnigen Regionen und im Sommer effektiv, weil dort mehr Sonnenstrahlung reflektiert werden kann als in Regionen mit geringerer Sonnenscheindauer. Zusätzlich würde dies Energieeinsparungen beim Betrieb von Klimaanlagen ermöglichen.

Die Methode ist im Hinblick auf ihre Wirkungsweise klar überschaubar. Sie stellt keinen größeren Eingriff in die Natur dar, als es Städte, Straßen, Siedlungen etc. ohnehin bereits sind. In diesem Sinne könnte die Maßnahme sofort umgesetzt werden.

Von Nachteil ist, dass die Anstriche bei Verschmutzungen immer wieder gereinigt oder erneuert werden müssten. Zumindest beim ersten Anstrich mit weißer Farbe könnten zusätzliche Ressourcen verbraucht werden, wenn der existierende Anstrich eigentlich noch nicht erneuert werden muss. Sollten die weißen Anstriche giftige Substanzen enthalten, wäre dies ein weiterer negativer Aspekt.

Zudem wären große Siedlungsflächen weltweit einzubeziehen, um einen – trotzdem geringen – globalen Effekt zu erzielen. Die Umsetzung des Vorschlags in die Praxis könnte mehrere Jahrzehnte dauern. Eine Studie schätzt für die verfügbare urbane Fläche als Effekt der Methode

eine mögliche Änderung des Strahlungsantriebs um nur -0,01 bis -0,2 W/m² (Lenton & Vaughan 2009). Dies wäre im Vergleich zum gesamten, durch den Menschen im Jahr 2005 erzeugten Strahlungsantrieb von 1,5 W/m² (IPCC 2007a) nur ein sehr geringfügiger Beitrag. Die Methode wird als eine der am wenigsten effektiven und teuersten Vorschläge eingeschätzt (Royal Society 2009). Wendete man die Methode auf nur 1 % der Festlandsoberfläche an, lägen die Material- und Arbeitskosten mit rund 300 Mrd. US$ pro Jahr bereits sehr hoch.

02 **Reflektivere Feldfrucht- und Grünlandsorten**
Vergleichbar mit der Methode des Weißens menschlicher Siedlungen gibt es den Vorschlag, das unterschiedlich starke Rückstrahlvermögen von Pflanzen zu nutzen. Die Idee ist, in der Landwirtschaft geeignete Pflanzensorten einzusetzen, die mehr Licht in Richtung Weltraum zurückstrahlen, als das bei derzeit genutzten Arten der Fall ist. Ein Beispiel hierfür ist der Mais. Es gibt verschiedene Untersorten von Mais, deren Albedo sich um bis zu 8 % unterscheidet. Die weltweite landwirtschaftliche Nutzfläche und die vom Menschen nicht oder teilweise genutzte bewachsene Landschaft bedecken rund ein Drittel der Landoberfläche. Würden reflektivere Arten diese Fläche bewachsen, gehen Schätzungen von einer Verringerung des Strahlungsantriebes um maximal 0,59 W/m² aus (Hamway 2007).

Eine konsequente Umsetzung dieses Vorschlages dürfte jedoch allein an der Größenordnung der Fläche scheitern. Der Aufwand für den Austausch des Pflanzenbewuchses in diesem Umfang stünde zudem in keinem Verhältnis zur erzielten Wirkung. Selbst wenn es gelänge, Sorten zu finden, die in den verschiedenen betroffenen Klimazonen gleich bleibenden Ertrag garantieren, wäre der Eingriff in die Natur insgesamt beispiellos und der damit verbundene Verlust ganzer Ökosysteme völlig inakzeptabel. Im Falle des Entstehens großer Monokulturen wäre neben der Artenvielfalt auch die wirtschaftliche Unabhängigkeit der landwirtschaftlichen Produzenten bedroht.

03 **Wüstenreflektoren**
Die Idee, Wüstengebiete mit reflektierenden Planen zu bedecken, setzt ebenfalls auf das Prinzip, die Albedo des Untergrundes zu erhöhen. Um einen deutlichen Effekt zu erzielen, wäre auch bei dieser Methode – wie bei den vorangegangenen Vorschlägen – eine extrem große Fläche einzubeziehen. Die Royal Society (2009) schätzt, dass 10 % der Festlandsoberfläche mit reflektierenden Materialien bedeckt werden müssten, um die durch den Menschen hervorgerufene Erwärmung des Klimas auszugleichen. Zur Umsetzung der Idee wären enorme Geldbeträge für Material, Durchführung, Instandhaltung und Entsorgung aufzuwenden. Wüstengebiete erscheinen zwar durch hohe jährliche Sonneneinstrahlung und geringe menschliche Nutzung besonders geeignet, um die Albedo zu erhöhen, ein solcher Eingriff hätte jedoch gravierende Folgen für die Umwelt. Das Abschotten des Sonnenlichtes durch das Abdecken des Wüstenbodens würde die Lebensgrundlage in einem der empfindlichsten Lebensräume der Erde zerstören. Auch die düngende Funktion der Wüsten für die Ozeane wäre eingeschränkt. Denn mit Wüstensand, der in der Atmosphäre über weite Strecken transportiert wird, gelangt auch Eisen in die Ozeane, das eine wichtige Rolle für die Nährstoffversorgung der Meeresalgen spielt. Hinzu tritt ein weiteres Problem: Eine derartige Änderung der Albedo könnte sich auf lokale und regionale Wetter- und Niederschlagsmuster auswirken, zum Beispiel auf die Monsunzirkulationen.

04 **Albedo des Ozeans**
Andere Vorschläge sehen vor, die Rückstrahlung des Sonnenlichtes durch helle, reflektierende Gegenstände (z. B. schwimmende Kissen) auf der Meeresoberfläche zu erhöhen. Würde die Idee in der benötigten Größenordnung umgesetzt werden, wäre ein gigantischer Teil des größten zusammenhängenden Ökosystems der Welt von einer Versorgung mit Licht abgeschnitten. Sonnenlicht ist jedoch eine Voraussetzung für Prozesse, die Leben im Meer und auf dem Festland erst ermöglichen. Die Ozeane spielen im Sauerstoff- und Kohlenstoffkreislauf der Erde eine ganz wesentliche Rolle, da sie Kohlendioxid aus der Atmosphäre aufnehmen und speichern. Vielfältige Funktionen der Ozeane würden bei Anwendung dieser Methode maßgeblich gestört werden. Zusätzlich wären Umweltauswirkungen durch den erzeugten Abfall sowie den notwendigen Installations-, Wartungs- und Entsorgungsaufwand zu erwarten. Plastikmüll im Meer ist eines der offensichtlichen Probleme. Vor allem Kunststoffprodukte und -partikel reichern Schadstoffe an, werden mit Nahrung verwechselt und gelangen so in die Nahrungsnetze (UBA 2010a). Die Idee, Gegenstände auf dem Meer zu platzieren, stünde damit im starken Widerspruch zu dem Ziel, den Müll in den Weltmeeren zu reduzieren. Hinzu kommt ein rein praktisches Problem. Um den Effekt auf die Albedo in vollem Umfang zu gewährleisten, müssten die reflektierenden Flächen frei von Verschmutzungen und Bewuchs sein. Die dafür nötigen Reinigungen würden zusätzliche Kosten sowie Chemikalieneinträge verursachen und erforderten außerdem einen hohen technischen Aufwand.

05
3.1.2 Erhöhung der Albedo von Wolken
Wolken bestehen aus Millionen kleinster Wassertröpfchen. Für ihre Entstehung spielen neben Temperatur und Luftfeuchte kleinste Partikel, wie Sandkörner, Salzkristalle oder Staub (so genannte Kondensationskerne), an denen Wasser kondensieren und sich Tröpfchen bilden können, eine wesentliche Rolle. Der Gehalt an Wassertröpfchen bestimmt die Reflektionseigenschaften von Wolken und damit ihre Albedo.

Die Erhöhung der Albedo von Wolken ist ein weiterer Vorschlag zum Geo-Engineering im Rahmen der Beeinflussung des Strahlungshaushaltes der Erde. Dieser Vorschlag wäre auf niedrige Wolken über den Ozeanen – sie bedecken etwa ein Viertel der Ozeanfläche – anwendbar. Die maritime Atmosphäre ist in der Tendenz sauberer und staubfreier. Eine künstliche Anreicherung der maritimen Atmosphäre mit Kondensationskernen könnte die Wolkenalbedo merklich erhöhen, weil sich dann erheblich mehr und kleinere Tröpfchen bilden würden, die das Sonnenlicht stärker streuen und zurückwerfen würden. Zudem erhöhen kleinere Tröpfchen die Lebenszeit der Wolken, denn es dauert länger, bis sich so große Tropfen bilden, dass die Wolken abregnen. Latham et al. 2008 schätzen, dass die Verdopplung der Wolkentröpfchen in den Wolken über den Ozeanen die Albedo so weit erhöhen würde, dass damit eine Verdopplung des atmosphärischen CO_2-Gehaltes gegenüber dem vorindustriellen Niveau kompensiert werden könnte. Die bisherigen Überlegungen zu künstlichen Kondensationskernen konzentrierten sich dabei auf winzige Salzpartikel, die aus dem Meerwasser gewonnen und in die Atmosphäre gesprüht werden.

Geeignete Regionen für die Erhöhung der Wolkenalbedo sind die Gebiete vor den Westküsten Nord- und Südamerikas sowie vor der Westküste Afrikas. Durch Schiffe oder Flugzeuge könnten geeignete Partikel, die als Kondensationskerne wirken, ausgebracht werden. Da Wolken räumlich unregelmäßig verteilt sind und ihre Lebensdauer beschränkt ist, müsste die Freisetzung der Partikel jedoch in größerer Menge, mit ausreichender räumlicher Verteilung und häufig wiederholt erfolgen. Besonders bei der Freisetzung durch Schiffe erreicht nur ein geringer Teil dieser Partikel die Gebiete, in denen Wolkenbildung stattfindet und Wolken vorhanden sind.

Der Vorschlag ist zwar technisch grundsätzlich umsetzbar, aber die Anwendung ist auf bestimmte Meeresregionen begrenzt. Außerdem können die notwendigen Partikel durch Flugzeuge und Schiffe nur in begrenzter Menge freigesetzt werden. Die Methode hätte einen Vorteil: Einmal eingesetzt, könnte die Abkühlungswirkung rasch eintreten, der Einsatzort bei Bedarf gewechselt oder das Verfahren kurzfristig gestoppt werden. Eine Anwendung der Methode auf großen Flächen stellt aber einen Eingriff in lokale bis regionale Wetter- und Strömungsmuster dar. Dabei wären Auswirkungen auf Windsysteme, Meeresströmungen und Niederschläge sowie möglicherweise dadurch auf Meeresorganismen denkbar.

Eines kann bereits jetzt festgehalten werden: Bevor die Anwendung einer solcher Methode tatsächlich in Betracht gezogen würde, müßten die Auswirkungen auf das Klima und die Umwelt detailliert erforscht werden. Die Umweltverträglichkeit und der Energieaufwand dieser Methode hängen einerseits maßgeblich von den verwendeten Partikeln und deren Herstellung ab, andererseits davon, wie die Partikel in die Atmosphäre ausgebracht werden, ob beispielsweise mit Schiffen oder Flugzeugen.

06 3.1.3 Stratosphärische Aerosole

Die Erdatmosphäre wird vertikal in mehrere Schichten eingeteilt. Die unterste Schicht ist die Troposphäre, auf die in einer Höhe von etwa 7 bis 17 km (je nach geographischer Breite - über den Tropen höher als über den Polen) die Stratosphäre folgt, die bis in eine Höhe von etwa 50 km reicht. In der Stratosphäre sind die Austauschprozesse von Luftmassen erheblich geringer als in der Troposphäre. Deshalb verweilen Substanzen, die in die Stratosphäre gelangen, dort deutlich länger als in der Troposphäre und sind damit auch wirkungsvoller. Das wird deutlich am Beispiel von Vulkanausbrüchen. Beim Ausbruch großer Vulkane werden Ascheteilchen und Schwefelverbindungen oft in Höhen von 10 bis 20 km geschleudert. Dort verweilen die Schwefelsäure- und Ascheteilchen viele Monate bis hin zu Jahren und bewirken, dass weniger Sonnenlicht bis zur Erdoberfläche durchdringt. So führen Vulkanausbrüche in der Tendenz zu einer Abkühlung, die beim Ausbruch einzelner großer Vulkane bis zu einigen Jahren andauern kann. Nach dem Ausbruch des Pinatubo im Jahre 1991 wurde in den folgenden zwei Jahren ein Rückgang der globalen Mitteltemperatur in Bodennähe um 0,1 bis 0,2 °C beobachtet (Robock & Mao 1995).

Auf der Grundlage der zuvor beschriebenen Effekte gibt es eine Reihe von Vorschlägen zum Geo-Engineering. Diese reichen von der Ausbringung von Aluminiumschnipseln oder reflektierenden Kleinstballons in die Stratosphäre bis zur Ausbringung von Chemikalien, vor allem von Schwefelverbindungen. Kleinstballons und andere reflektierende Gegenstände müssten jedoch zunächst in großer Anzahl und mit entsprechendem Energieaufwand hergestellt werden. Zudem würden diese Gegenstände nach einer gewissen Zeit aus der Stratosphäre in die Troposphäre absinken und dort unter Umständen den Flugverkehr behindern oder andere nachteilige Auswirkungen haben. Die Umsetzung dieser Vorschläge ist deshalb wenig realistisch.

Häufiger diskutiert wird die Idee, Schwefelwasserstoff oder Schwefeldioxid in der Stratosphäre freizusetzen. Diese Substanzen würden dort zu Sulfatpartikeln mit geeigneter Größe oxidieren, die das Sonnenlicht streuen und damit eine geringere Sonneneinstrahlung an der Erdoberfläche bewirken. Rasch et al. 2008 schätzen, dass zum Ausgleich der erwärmenden Wirkung der durch den Menschen ausgestoßenen Treibhausgase zwischen 1,5 und 5 Terragramm[5] Schwefel pro Jahr in der Stratosphäre freigesetzt werden müssten. Die



abkühlende Wirkung würde dabei erheblich von der Größenverteilung der gebildeten Aerosolpartikel abhängen und wäre nicht von vornherein klar. Zudem verbleiben diese Aerosole nur eine gewisse Zeit in der Stratosphäre, so dass in regelmäßigen Abständen Schwefelverbindungen ausgebracht werden müssten, um einen langfristigen Effekt zu garantieren. Generell ist diese Methode in ihrer Wirkung schwer zu steuern. Es ist nicht ausreichend wissenschaftlich geklärt, wie viel Schwefelverbindungen zu welcher Zeit in die Stratosphäre eingebracht werden müssten, um den gewünschten Effekt auf die bodennahe Lufttemperatur zu erzielen. Wir können nicht davon ausgehen, dass sich genau die gleichen Prozesse abspielen würden wie bei Vulkanausbrüchen.

Die Ausbringung von Schwefelverbindungen in der Stratosphäre scheint in finanzieller Hinsicht – gemessen an Material- und Betriebskosten – ein vergleichsweise preisgünstiger Vorschlag zu sein. Ungeachtet dessen schätzen wir diese Methode aber als besonders problematisch ein, weil sie erhebliche unerwünschte Nebenwirkungen haben kann. So sind beispielsweise, verursacht durch die verminderte Sonneneinstrahlung am Boden, Auswirkungen auf die Wolkenbildung in der Troposphäre wahrscheinlich. Beobachtungen nach dem Ausbruch des Pinatubo zeigen auch einen Rückgang der Niederschläge über Landflächen (Trenberth & Dai 2007). Modellsimulationen ergaben Störungen des afrikanischen und asiatischen Sommermonsuns und eine Reduzierung der Niederschläge, die Voraussetzung für die Nahrungsmittelproduktion für Milliarden von Menschen sind (Robock et al. 2008). Nicht nur landwirtschaftliche Erträge würden wahrscheinlich zurückgehen, auch Wälder und andere natürliche Kohlenstoffsenken könnten betroffen sein. Neben der Beeinflussung globaler Wetterphänomene sorgte der Ausbruch des Pinatubo auch für eine deutliche Reduktion des stratosphärischen Ozons um weltweit 2 % (Harris et al. 1997). Der mögliche Abbau stratosphärischen Ozons durch chemische Reaktionen an den Sulfattröpfchen ist ein weiterer, sehr kritischer Nebeneffekt der Methode. Möglicherweise könnte bei dieser Methode als unerwünschte Nebenwirkung auch saurer Regen entstehen. Ob und inwieweit dieser Nebeneffekt eintreten kann, muss noch untersucht werden.

Wir fassen zusammen, dass die Methode der dauerhaften Schaffung einer künstlichen Sulfataerosolschicht in der Stratosphäre erhebliche – auch nicht gewünschte – Auswirkungen haben kann. Es ist gegenwärtig nicht möglich, diese Auswirkungen in ausreichendem Maße zu ermitteln und eine hinreichende Risikoabschätzung durchzuführen. Aus Vorsorgegründen darf diese Methode vor hinreichender Klärung der möglichen Risiken keinesfalls zur Anwendung kommen.

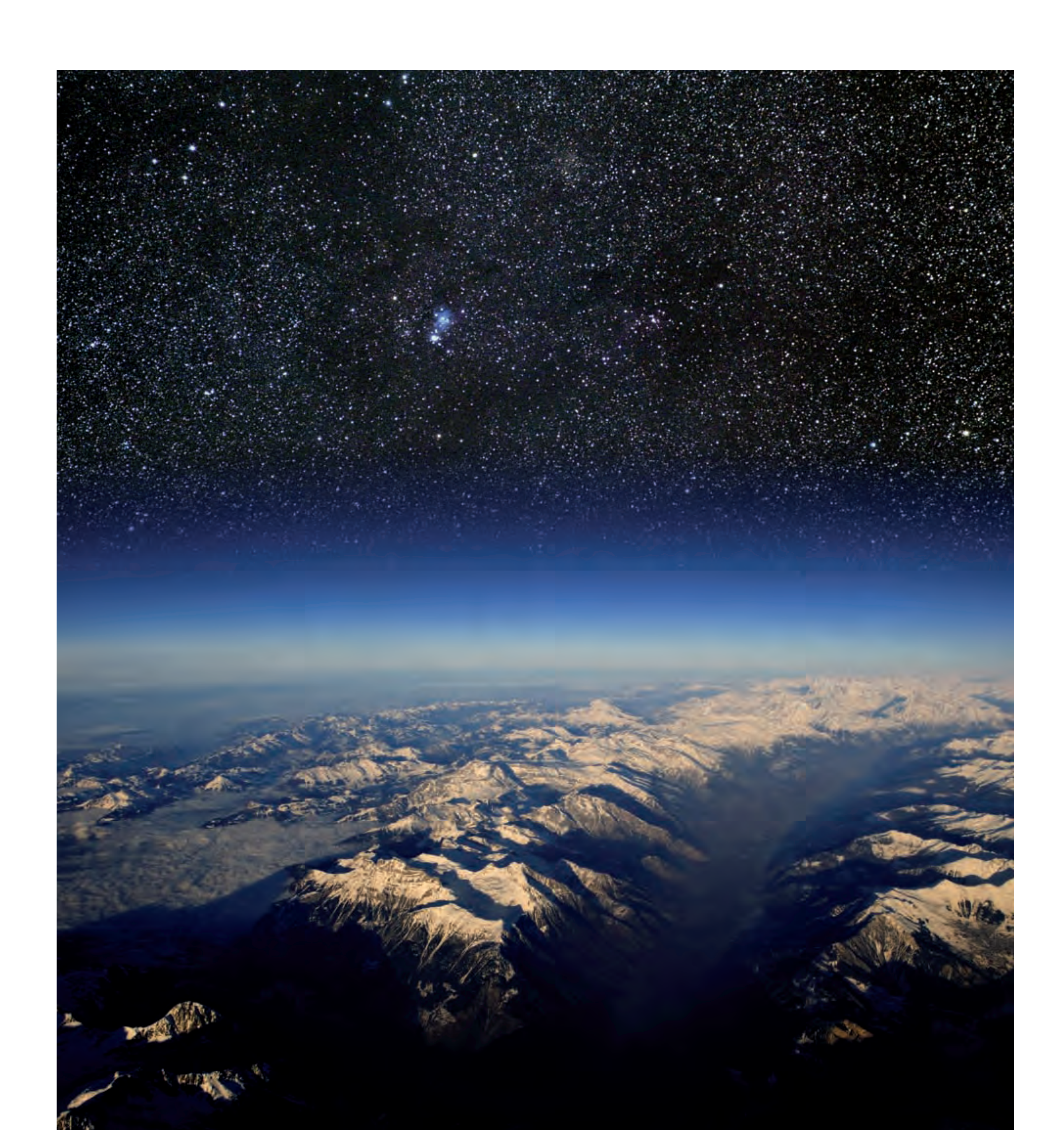
07 3.1.4 Beeinflussung des Strahlungshaushaltes durch Installationen im erdnahen Weltraum

Die Temperatur auf der Erde hängt entscheidend von der eingestrahlten Sonnenenergie ab. Deshalb werden Ideen diskutiert, mit Hilfe von Installationen im Weltraum die auf der Erde ankommende Sonnenstrahlung zu reduzieren. Als Standorte werden erdnahe Umlaufbahnen, der Mond oder eine Position zwischen Erde und Sonne genannt.

Die Vorschläge für Installationen im erdnahen Raum reichen von spiegelnden Scheiben bis zu Saturn-ähnlichen Ringen aus Staubpartikeln. Um die Sonneneinstrahlung um 2 % zu reduzieren, wäre eine Masse von 2 Milliarden Tonnen Staubpartikeln nötig (Royal Society 2009). Dünne Scheiben und Staub würden jedoch wahrscheinlich nach einem gewissen Zeitraum auf die Erde absinken (Keith & Dowlatabadi 1992).

Alternativ wird eine Position für reflektierendes Material zwischen Erde und Sonne vorgeschlagen, an der beispielsweise ein einzelner Riesenspiegel, ein ultradünnes Geflecht aus Aluminiumfäden oder Billionen reflektierender Scheiben installiert werden könnten. So wäre für eine Reduktion der Sonnenstrahlung um rund 2 % ein Sonnenschild von circa 3 Millionen Quadratkilometern nötig (Royal Society 2009).

Die Installation von spiegelnden Objekten im Weltraum würde zu einer Änderung der solaren Einstrahlung an der Erdoberfläche führen, die jedoch nicht gleichmäßig auf der Erde verteilt wäre. Dies würde einen gravierenden Eingriff bedeuten, der sich auf die atmosphärische und ozeanische Zirkulation auswirken würde. Denn die atmosphärische Zirkulation wird wesentlich durch die unterschiedlichen Einstrahlungsverhältnisse am Äquator und den Polen gesteuert. Ändern sich diese



Strahlungsgrößen, hat das weitreichende Auswirkungen auf die Zirkulation und damit auf Temperaturen, Verdunstung, Bewölkung und Niederschläge in vielen Regionen der Erde. Daraus ergeben sich wiederum Konsequenzen für die Lebensbedingungen des Menschen, die Nahrungsmittelproduktion und die Stabilität von Ökosystemen.

Es gibt erhebliche Bedenken über die Höhe der Kosten. Darüber hinaus ist fraglich, ob diese Geo-Engineering-Maßnahmen umkehrbar sind oder schnell gestoppt werden können. Die Steuerbarkeit von in großer Zahl oder weit von der Erde ausgebrachten künstlichen Objekten ist schwierig, so dass damit zudem ein Sicherheitsrisiko verbunden ist.

3.1.5 Zusammenfassung und Bewertung der Methoden zur Beeinflussung des Strahlungshaushaltes

Die Geo-Engineering-Methoden zur Beeinflussung des Strahlungshaushaltes knüpfen nicht an der Ursache der Klimaerwärmung an. Sie ändern nichts an der Tatsache, dass Treibhausgase in die Atmosphäre emittiert werden und deren Konzentrationen weiter ansteigen. Damit bleiben nach wie vor große ökologische Folgeprobleme wie die Ozeanversauerung bestehen, die zu dramatischen Folgen für die Tier- und Pflanzenwelt der Meere führen kann. Mit den Methoden zur Beeinflussung des Strahlungshaushaltes soll lediglich das erwärmte Klima reguliert werden.

Bei fortgesetzter Emission von Treibhausgasen müssten diese Eingriffe kontinuierlich erfolgen, um den Temperaturanstieg zu begrenzen. Eine Beendigung der Maßnahmen würde wegen des Anstiegs der Treibhausgaskonzentrationen zu einer rasanten Erwärmung führen. Diese Maßnahmen können deshalb selbst dann kaum beendet werden, wenn sie erhebliche oder schwerwiegende Schäden verursachen.

Bei vielen dieser Methoden ist derzeit völlig unklar, ob sie in der Praxis überhaupt funktionieren. Es handelt sich überwiegend um theoretische Vorschläge, die kaum mit Forschungsergebnissen unterlegt sind. Die Wirksamkeit vieler Methoden kann nicht ausreichend eingeschätzt werden. Es können erhebliche, nicht vorhersehbare Nebenwirkungen auftreten, deren Risiken nicht bekannt und kalkulierbar sind. Einige Methoden, wie zum Beispiel die Einbringung von Schwefel in die Stratosphäre würden bei ihrer praktischen Erprobung ein globales Großexperiment mit unbekanntem Ausgang darstellen.

Der global gemittelte Strahlungsantrieb für die durch den Menschen freigesetzten Treibhausgase betrug im Jahr 2008 2,74 W/m^2, davon entfielen allein auf Kohlendioxid 1,74 W/m^2 (NOAA 2009). Mit Blick auf diesen Strahlungsantrieb stellt schon die Größenordnung des Eingriffs, der im Rahmen des Geo-Engineering erforderlich wäre, um einen merklichen Effekt auf das globale Klima zu erzielen, eine außerordentliche Schwierigkeit und Herausforderung dar. Generell scheinen die Errichtung, der Betrieb, die Wartung der nötigen Infrastruktur sowie die notwendige kontinuierliche Anwendung fast all dieser Geo-Engineering-Maßnahmen einen enormen Energie- und Materialaufwand vorauszusetzen. Bei den meisten Maßnahmen zur Beeinflussung des Strahlungshaushalts ist zu erwarten, dass der Aufwand in keinem angemessenen Verhältnis zur erzielten Wirkung steht.

Selbst wenn mit Maßnahmen zum Geo-Engineering eine Abkühlung des globalen Klimas erreichbar wäre, ist nicht klar, welche Klimaänderungen dabei im regionalen Maßstab verursacht werden. Die Temperaturen und Niederschläge können sich ändern, ebenso können Änderungen der Zirkulation eintreten. Diese Veränderungen können sich in den verschiedenen Regionen der Erde sehr nachteilig auf Mensch und Umwelt auswirken.

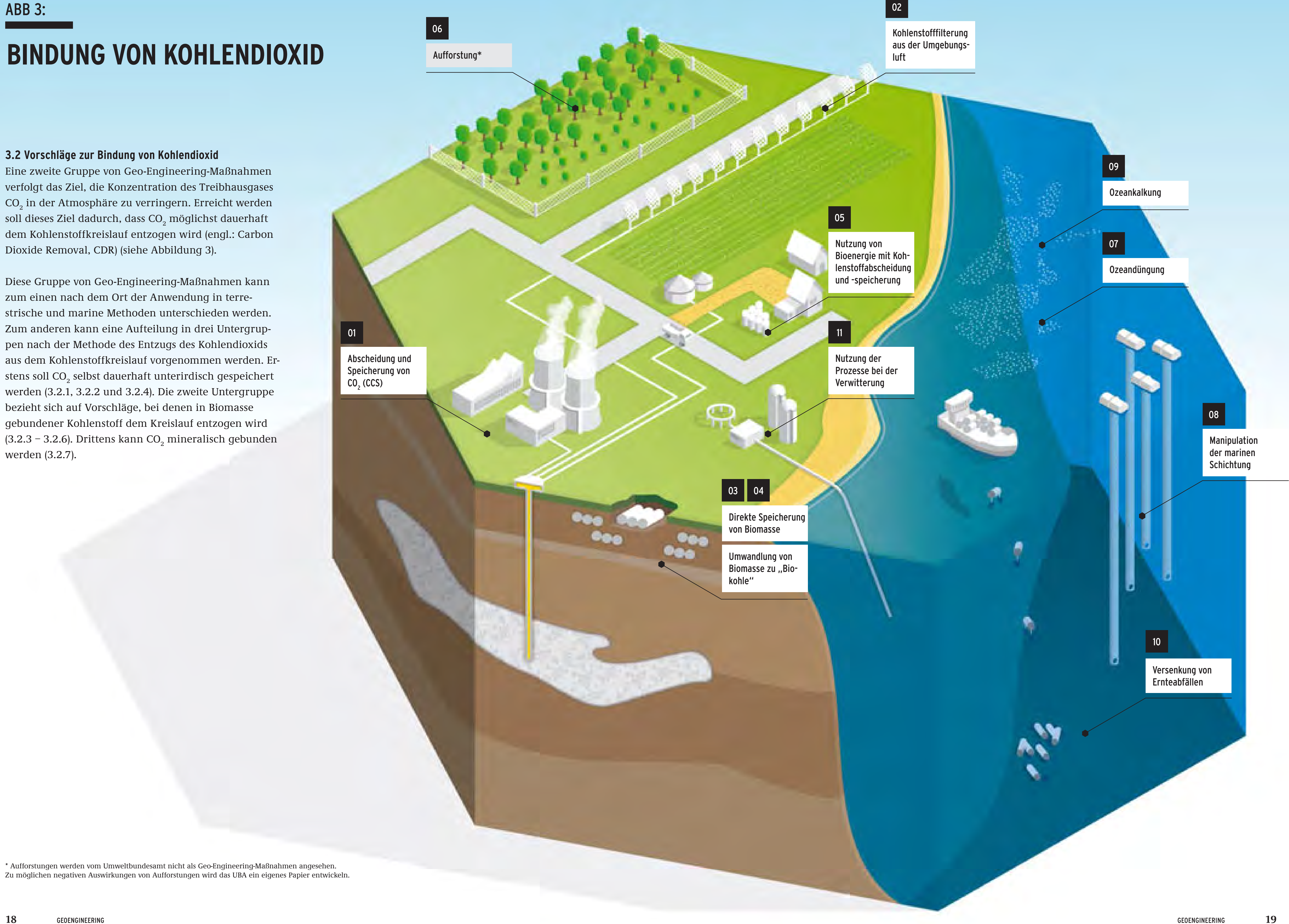
Installationen im Weltraum, die die Einstrahlung an der Erdoberfläche verändern, könnten die gesamte atmosphärische und damit auch die ozeanische Zirkulation beeinflussen. Darüber hinaus sind Vorschläge, die auf eine Änderung der Reflektivität von Wolken oder Teilen der Erdoberfläche abzielen, in ihrer Wirkung erheblich von Einflüssen wie der Bewölkung und dem Niederschlag abhängig und benötigen zudem Flächen von enormer Größe.

Für die Mehrheit der Methoden sind die Annahmen über die anfallenden Kosten sehr unsicher. Die Folgekosten können schon allein wegen der großen Unsicherheiten über die Nebenwirkungen nicht geschätzt werden.

Sowohl bezüglich der Kosten als auch mit Blick auf eine Vielzahl unkalkulierbarer Risiken stellen Methoden zur Beeinflussung des Strahlungshaushaltes keine vernünftige Alternative zu Klimaschutzmaßnahmen dar, die an den Wurzeln – den anthrophogenen Treibhausgasemissionen – ansetzen.

ABB 3:

BINDUNG VON KOHLENDIOXID



3.2 Vorschläge zur Bindung von Kohlendioxid

Eine zweite Gruppe von Geo-Engineering-Maßnahmen verfolgt das Ziel, die Konzentration des Treibhausgases CO_2 in der Atmosphäre zu verringern. Erreicht werden soll dieses Ziel dadurch, dass CO_2 möglichst dauerhaft dem Kohlenstoffkreislauf entzogen wird (engl.: Carbon Dioxide Removal, CDR) (siehe Abbildung 3).

Diese Gruppe von Geo-Engineering-Maßnahmen kann zum einen nach dem Ort der Anwendung in terrestrische und marine Methoden unterschieden werden. Zum anderen kann eine Aufteilung in drei Untergruppen nach der Methode des Entzugs des Kohlendioxids aus dem Kohlenstoffkreislauf vorgenommen werden. Erstens soll CO_2 selbst dauerhaft unterirdisch gespeichert werden (3.2.1, 3.2.2 und 3.2.4). Die zweite Untergruppe bezieht sich auf Vorschläge, bei denen in Biomasse gebundener Kohlenstoff dem Kreislauf entzogen wird (3.2.3 – 3.2.6). Drittens kann CO_2 mineralisch gebunden werden (3.2.7).

* Aufforstungen werden vom Umweltbundesamt nicht als Geo-Engineering-Maßnahmen angesehen.
Zu möglichen negativen Auswirkungen von Aufforstungen wird das UBA ein eigenes Papier entwickeln.

ANMERKUNG ZU DEN EINHEITEN

1 Gigatonne Kohlenstoff (Gt C) entspricht 10^9 Tonnen Kohlenstoff (t C).
1 Tonne Kohlenstoff entspricht 3,67 Tonnen Kohlendioxid.
Oft findet man auch die Einheit Petagramm (Pg), wobei 1 Pg = 10^{15} Gramm = 1 Gt.
Da beim Kohlenstoff-Kreislauf nicht nur das gasförmige Kohlendioxid betrachtet wird, sondern alle Verbindungen, in denen Kohlenstoff vorkommt, beziehen sich diese Angaben immer auf Gt Kohlenstoff.

01 3.2.1 Abscheidung und Speicherung von Kohlendioxid (CCS)

CO_2-Emissionen von großen stationären Punktquellen (vor allem Kohlekraftwerken) sollen dauerhaft am Übertritt in die Atmosphäre gehindert werden, indem das CO_2 aus dem Rauchgas abgeschieden und anschließend dauerhaft gespeichert wird (Englisch: **C**arbon **C**apture and **S**torage: CCS). Das abgeschiedene CO_2 muss in tief gelegene geologische Formationen verpresst werden, die geeignet sind, eine dauerhafte Speicherung zu gewährleisten. Je nach Entfernung des Speicherorts von der Punktquelle ist eine entsprechende Transportinfrastruktur vorzusehen (UBA 2009a).

Das Potenzial von CCS hängt in erster Linie von den tatsächlich verfügbaren Kapazitäten geeigneter Speicher ab. Die Eignung der Speicher ist im Wesentlichen am dauerhaften Abschluss des verbrachten Gases zu messen. Bei CCS müssen Speichergröße, Lage und die zeitliche Verfügbarkeit der Speicher an die jeweiligen Emissionsquellen angepasst sein. Die konkrete geologische Erkundung ist noch nicht weit genug fortgeschritten, um verlässliche Aussagen über die Sicherheit, Aufnahmefähigkeit und Kapazitäten geologischer Speicherformationen geben zu können.

Die meisten Pilotprojekte testen die Integration der CO_2-Abscheidung bei der Kohleverstromung. Es gibt weltweit bislang kein Beispiel für den großtechnischen Einsatz des gesamten Verfahrensablaufs von der Abscheidung bis zur Speicherung und keine Erfahrung mit der Abscheidung des kompletten CO_2- Abgasstroms eines Kraftwerks. Mit einer kommerziellen Verfügbarkeit ist frühestens ab 2025 zu rechnen (UBA 2009a; WI 2010).

CCS wird üblicherweise nicht zu den Geo-Engineering Methoden gezählt, sondern häufig als CO_2-Minderungsoption bezeichnet, obwohl es als End-of-pipe-Technologie die Entstehung von CO_2 nicht vermeidet. Für die Abscheidung und den Transport muss zudem Energie aufgewandt werden, so dass z. B. bei der Kohleverstromung ca. 30 % mehr Kohle je produzierter Kilowattstunde verbrannt werden muss und dementsprechend mehr CO_2 und weitere Umweltwirkungen der Kohleverstromung entstehen (Abb. 4).

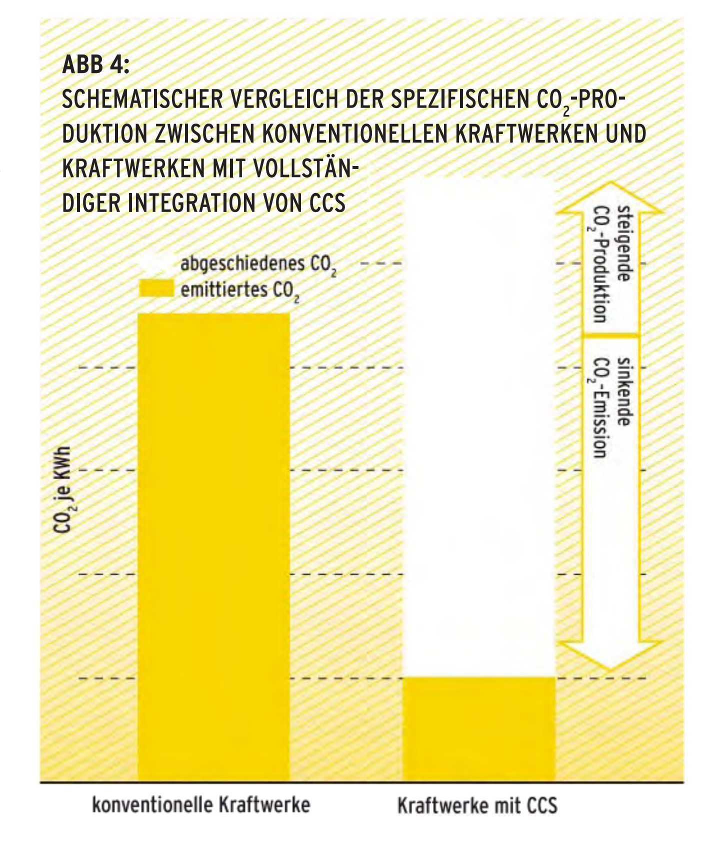


ABB 4:
SCHEMATISCHER VERGLEICH DER SPEZIFISCHEN CO_2-PRODUKTION ZWISCHEN KONVENTIONELLEN KRAFTWERKEN UND KRAFTWERKEN MIT VOLLSTÄNDIGER INTEGRATION VON CCS

Das Potenzial von CCS und weiteren Verfahren mit CO_2-Speicherung ist durch die Konkurrenz zu anderen Nutzungen des Untergrundes, wie die Energiespeicherung für Erd-/Biogas oder Wasserstoff, ferner Rohstoffgewinnung und Geothermie eingeschränkt. Das UBA empfiehlt dafür zu sorgen, dass nachhaltige Nutzungen – wie die geothermische Wärme- und Stromerzeugung – durch die Anwendung von CCS nicht eingeschränkt werden (UBA 2009a).

In jedem Einzelfall ist zu untersuchen, welche lokalen Umweltwirkungen die CO_2-Speicherung haben kann; etwa die Versalzung durch die Verdrängung salzhaltiger Wässer in Grundwasserleiter und/oder eine Versauerung des Trinkwassers. Schließlich ist zu bedenken, dass bei der CO_2- Speicherung potenziell das Risiko von CO_2-Leckagen – und damit für ein Entweichen des Gases aus den Speichern – besteht.

Das UBA befürwortet grundsätzlich die weitere Erforschung dieser Technologie, hält aber einen gesetzlichen Rahmen für erforderlich, der die Sicherheitsanforderun-

gen so hoch setzt, dass CCS verantwortet werden kann. So hat das UBA für das geplante Gesetz zu CO_2-Transport und -Speicherung notwendige Grundlagen für die Umweltanforderungen der CCS-Technologie formuliert (UBA 2009a).

3.2.2 Kohlenstofffilterung aus der Umgebungsluft

02

Kohlendioxid kann auch direkt aus der Umgebungsluft gefiltert werden. Diskutiert werden drei Filtertechniken: Filterung, die in Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit gesteuert wird und Anlagerung des CO_2 an Feststoffen, pH-reguliert in Flüssigkeiten oder katalysiert mit Hilfe von Enzymen.

Die Idee solcher Filtertechniken ist, Anlagen – zum Beispiel so genannte „künstliche Bäume"– großflächig entlang von Straßen zu errichten, die der Umgebungsluft CO_2 entziehen mit der Möglichkeit, das Gas anschließend im Untergrund oder der Tiefsee zu lagern. Es bestehen kaum Zweifel, dass diese Methode technisch möglich ist, aber weil die CO_2-Konzentration in der Atmosphäre mit 0,04 % beispielsweise etwa 300-fach geringer ist als im Rauchgas eines Kraftwerks, ist die Effizienz der Abscheidung von vornherein begrenzter als bei CCS. Das Verfahren ist damit deutlich teurer als CCS.

Der Betrieb der Anlagen würde enorme zusätzliche Energie benötigen – insbesondere für die Trennung des CO_2 von den Filterstoffen. Angenommen, die eingesetzte Energie stammte aus einem vergleichbaren Energiemix, wie er heute verwendet wird, würde mindestens halb so viel zusätzliches CO_2 emittiert, wie der Atmosphäre entzogen wird (Dessler, 2009). Der Vorteil der Kohlenstofffilterung aus der Umgebungsluft besteht darin, dass die Methode praktisch überall angewendet werden kann. Durch die Nähe etwa zu einem Untergrundspeicher könnten Kosten für den Transport gespart werden. Weiterer Vorteil gegenüber CCS ist, dass die Umgebungsluft im Unterschied zu Abgasströmen relativ unbelastet von Schadstoffen ist, die bei der Filterung oder der Ablagerung zusätzliche Probleme verursachen könnten.

Dennoch lägen die Kosten wahrscheinlich bei einigen Hundert Euro pro Tonne CO_2 und damit deutlich höher als die Kosten für konventionelle Minderungsmaßnahmen (Keith et al. 2009). Da es bislang weltweit noch kein einziges Demonstrationsprojekt für diese Methode gibt, sind die Kosten schwer einzuschätzen. Diese Methode setzt auf eine große Anzahl von Anlagen, da die einzelne Anlage nur geringe Mengen CO_2 bindet. Dies bedingt demzufolge einen enormen logistischen Aufwand. Nicht zuletzt ist – ähnlich wie bei CCS – dieser Ansatz begrenzt durch die Kapazitäten verfügbarer Speicher für CO_2. Insbesondere bei einer Anwendung in einem klimarelevanten Umfang würden sich der Einsatz und die Entsorgung der Chemikalien zur CO_2-Filterung in erheblichem Umfang nachteilig auf die Umwelt auswirken. Die Risiken der CO_2-Speicherung sind im Kapitel 3.2.1 beschrieben.

3.2.3 Methoden auf Basis von Biokohle und Biomasse

Bei pflanzlichen Wachstumsprozessen wird durch Photosynthese Kohlendioxid in Pflanzen gebunden. Landökosysteme entfernen so jedes Jahr über 3 Gt Kohlenstoff (ca. 11 Gt CO_2) aus der Atmosphäre (Canadell & Raupach 2008). Pflanzen speichern Kohlenstoff in besonderem Maße in derjenigen Lebensphase, in der sie deutlich an Masse zunehmen.

Wenn die Pflanzen absterben und zersetzt oder verbrannt werden, wird der in ihnen gespeicherte Kohlenstoff überwiegend als CO_2 freigesetzt. So werden in den Tropen durch Brandrodung und Abholzung jedes Jahr etwa 1,5 Gt Kohlenstoff frei. Pflanzen sind also nur ein vorübergehender Speicher von Kohlenstoff. Gleiches gilt für Produkte aus Pflanzen, wie Holzprodukte (Möbel) oder Biokraftstoffe.

Die nachfolgenden Vorschläge für Geo-Engineering-Maßnahmen zielen darauf ab, den Kohlenstoff in den Pflanzen selbst zu speichern oder in Produkten, die aus den Pflanzen hergestellt wurden, zum Beispiel Bauholz. Gemeinsam ist diesen Methoden, dass ihr Potenzial über die Verfügbarkeit von Biomasse beschränkt ist. Der Anbau von Biomasse zu diesen Zwecken erfordert eine Intensivierung der Landwirtschaft. Das Risiko einer Verstärkung bereits bestehender lokaler Umweltprobleme, wie Wassermangel, Bodendegradation, Erosion, Dünger- und Pestizideinsatz sowie Reduzierung der Artenvielfalt, ist im Einzelfall zu prüfen, wie auch die mögliche Konkurrenz hinsichtlich des Bedarfs an fruchtbaren Ackerflächen für die Nahrungsmittelproduktion.



03

Direkte Speicherung von Biomasse

Durch eine gezielte Speicherung von Biomasse soll verhindert werden, dass bei den natürlich stattfindenden Zersetzungsprozessen von abgestorbenem Pflanzenmaterial CO_2 wieder an die Atmosphäre abgegeben wird. Als Ausgangsmaterial kommen alle Formen von Pflanzenmaterial in Frage. Das Pflanzenmaterial soll hierfür entweder luftdicht verschlossen im Boden eingelagert oder im Meer versenkt werden (siehe Kapitel 3.2.6). Der Energieaufwand für die Umsetzung des Vorschlages wäre sehr hoch. In einer Größenordnung, die einen relevanten Beitrag zur Verminderung der Emissionen leistet, ist die direkte Speicherung von Biomasse kaum realisierbar. Weder energetisch noch wirtschaftlich scheint die Idee hinreichend durchdacht zu sein (Royal Society 2009). Schließlich würden nicht nur Kohlenstoff sondern auch wichtige – in der Biomasse gebundene – Nährstoffe dem natürlichen Kreislauf entzogen.



04

Umwandlung von Biomasse zu „Biokohle"

Biomasse soll zu sogenannter „Biokohle" umgewandelt werden. Diese soll anschließend unter natürliche Böden gemischt oder zur Energiegewinnung genutzt werden. Zwei Verfahren zur Umwandlung werden diskutiert. Bei der Pyrolyse von Biomasse wird organisches Material bei niedriger Sauerstoffkonzentration erhitzt und auf diesem Wege teilweise zersetzt. Als Nebenprodukte entstehen als Biokraftstoffe verwendbare Öle und Gase. Alternativ wird die Anwendung der Hydrothermalen Karbonisierung (HTC) untersucht. Dabei soll Biomasse unter hohem Druck in Wasser erhitzt und auf diese Weise verkohlt werden. Abhängig vom Ausgangsmaterial soll es möglich sein, durch Pyrolyse bis zur Hälfte und durch HTC zwischen 70 und 80 % des in der Biomasse enthaltenen Kohlenstoffs in Biokohle umzuwandeln. Biokohle, vermischt mit natürlichen, ertragsarmen Böden, soll erst nach mehreren Jahrzehnten bis Jahrhunderten allmählich zersetzt werden. Währenddessen soll sich die Bodenqualität hinsichtlich der Ertragsfähigkeit verbessern (Lehmann 2006). Die Befürworter der Technik berufen sich auf das historische Beispiel der Terra Preta-Böden[6], die wahrscheinlich aus Holzkohle entstanden und etwa 2.000 Jahre alt sind.

Als Ausgangsmaterial können neben Anbaubiomasse auch Biomasserückstände genutzt werden, die in der Industrie, als Stadtabfall oder in der Forst- und Landwirtschaft anfallen, z. B. aus Papiermühlen, als Grünschnitt oder als ungenutzte Pflanzenteile aus der Nahrungsmittelproduktion. Eine grobe Schätzung ergab, dass durch die Pyrolisierung solcher Rückstände weltweit theoretisch 0,16 GtC/ Jahr in Biokohle gebunden werden könnten.

Hinsichtlich der Verwendung von Biokohle als Energieträger liegen keine gesicherten Erkenntnisse vor. Überdies ist es fraglich, ob nicht die direkte energetische Verwertung des Ausgangsstoffes Biomasse effektiver ist als die Nutzung von Biokohle.

Offen bleibt, ob ausreichend Biomasse zur Umwandlung in Biokohle zur Verfügung steht und auch weiterhin anfällt, da Rückstände von Biomasse bereits heute vielfach genutzt werden und unter anderem einen natürlichen Beitrag gegen Bodenverarmung und -erosion darstellen. Zu klären ist auch, welche technische Ausstattung – vor allem auch für den Einsatz in weniger entwickelten Regionen – nötig wäre und ob diese schon verfügbar ist. Darüber hinaus ist unklar, ob die von den Terra Preta-Böden in Amazonien abgeleiteten Eigenschaften genauso für Biokohle und in anderen Klimaten zutreffen. So sind weder Langzeitstabilität noch Wasser- und Nährstoffverfügbarkeit ausreichend untersucht. Bislang unzureichend erforscht sind das Auslaugverhalten, das Abbauverhalten, die Nährstoffhaltekapazität, die Wechselwirkungen im Boden, der Einfluss der Biokohle auf den Bodenkohlenstoffhaushalt und – insbesondere bei Abfallbiomasse als Einsatzstoff – die Schadstoffgehalte und deren Wirkungen im Boden.

05

3.2.4 Nutzung von Bioenergie mit Kohlenstoffabscheidung und -speicherung

Alternativ zur direkten Speicherung von Kohlenstoff in Biomasse durch – teilweise – Verhinderung oder Verzögerung der Zersetzung (vgl. 3.2.3) existiert der Vorschlag, Biomasse energetisch zu nutzen und das

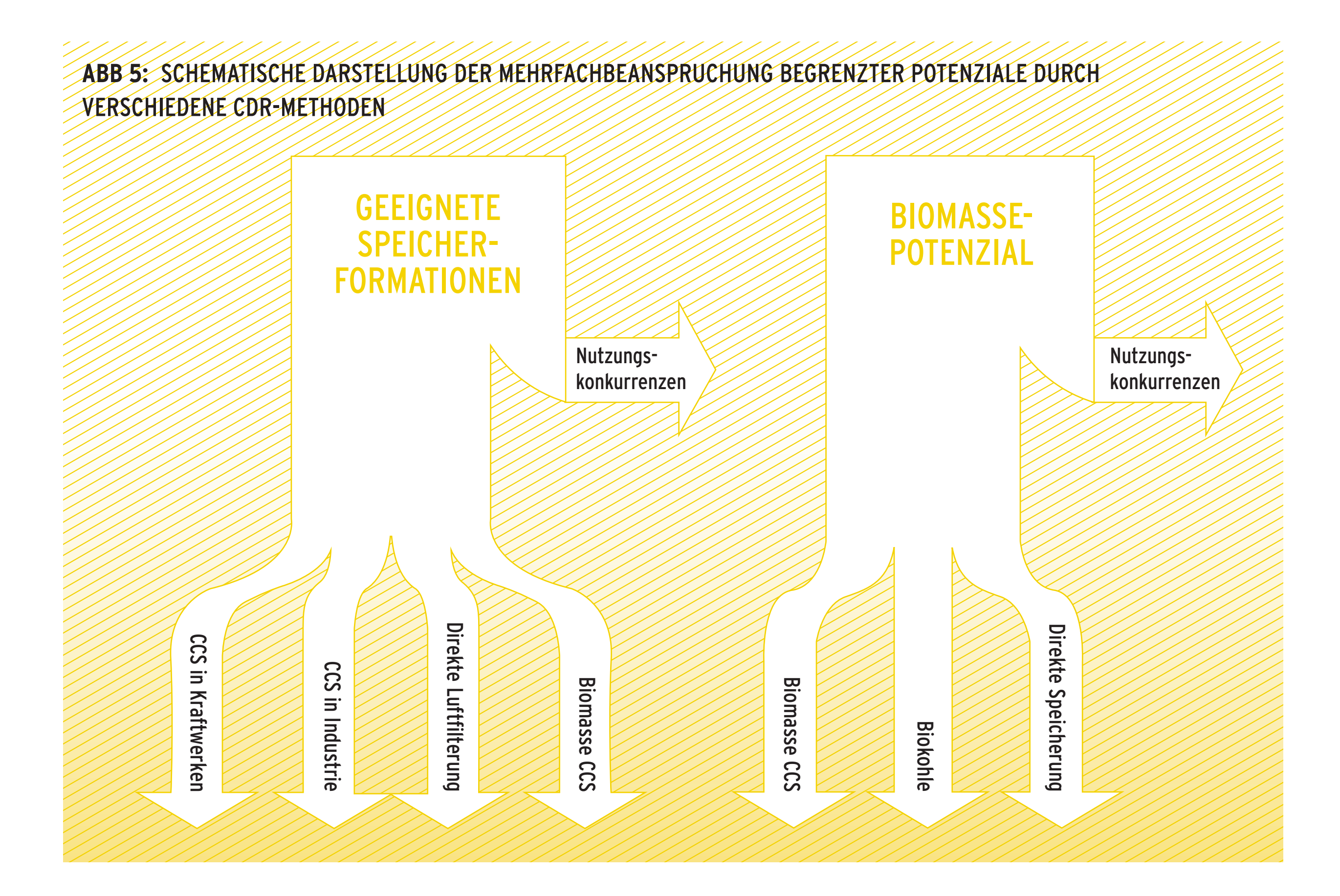


ABB 5: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER MEHRFACHBEANSPRUCHUNG BEGRENZTER POTENZIALE DURCH VERSCHIEDENE CDR-METHODEN

dabei frei werdende CO_2 abzuscheiden und dauerhaft unterirdisch zu speichern. Es handelt sich dabei um **B**io-**E**nergy with **C**arbon **C**apture and **S**torage, kurz BE-CCS. Wie der Name sagt, kombiniert BE-CCS etablierte Verfahren zur Nutzung von Bioenergie und das in der Erprobung befindliche CCS miteinander (3.2.1).

BE-CCS wird derzeit nicht angewandt. Während Biomasse weltweit größtenteils dezentral in kleinem Maßstab genutzt wird, setzt CCS aus ökonomischen Gründen jedoch große CO_2-Ströme voraus. Daher kommt BE-CCS vermutlich nur für größere Anlagen, wie groß dimensionierte Biomassekraftwerke, Papiermühlen oder Bioethanolraffinerien (Aznar et al. 2006) in Betracht, was eine große Konzentration von Biomasseströmen erfordert.

Attraktiv erscheint BE-CCS vor allem deshalb, weil möglicherweise sogar eine negative CO_2-Bilanz[7] möglich wäre. Diese Annahme bedarf allerdings für die unterschiedlichen Optionen der energetischen Biomassenutzung einer Überprüfung durch Energie- und Stoffbilanzen der gesamten Prozesse. Kritisch für die Energiebilanzen ist der energetische Aufwand für CO_2-Abscheidung, -Transport und -Speicherung sowie Transport und ggf. Anbau der Biomasse.

Eine Nutzung im großen Maßstab wäre mit den gleichen Risiken und Einschränkungen wie beim CCS (3.2.1) und anderen Verfahren zur Biomassenutzung (3.2.3) verbunden. Der potenzielle Beitrag von BE-CCS zur Kohlendioxid-Bindung wird also einerseits durch die vorhandenen Speicherkapazitäten für CO_2 und andererseits durch die Biomassepotenziale bestimmt (Abb. 5).

06 3.2.5 Aufforstung

Durch Aufforstung kann zusätzlich Kohlendioxid aus der Atmosphäre gebunden werden. Dazu wurden im Kyoto-Protokoll bereits Anreize für Industrieländer gesetzt. Bei den Klimaverhandlungen in Cancùn 2010 wurden Entscheidungen getroffen, die den Weg dafür frei machen, Anreize für ein verbessertes Landnutzungsmanagement in den Entwicklungsländern zu schaffen.

Viele dieser Maßnahmen sind unter konventionelle Maßnahmen der Landnutzung einzuordnen. Wenn bei der Wiederbewaldung standortgerechte Baumarten verwendet werden und nachhaltige naturnahe Bewirtschaftungsformen zur Anwendung kommen, kann damit neben dem Klimaschutz auch ein Beitrag zum Schutz der Biologischen Vielfalt geleistet werden. Das Umweltbundesamt zählt Aufforstungen nicht zu den Geo-Engeneering-Maßnahmen. Allerdings werden in der Literatur im Zusammenhang mit Aufforstungen auch Geo-Engineering Methoden beschrieben, darunter fallen der Einsatz geklonter oder genmanipulierter Pflanzen und die Pflanzung von einheitlichen Plantagenwäldern nicht-standortgerechter Arten. Während naturnahe Aufforstung und nachhaltige Waldbewirtschaftung positiv zu bewerten sind, bergen solche Geo-Engineering-Methoden viele Probleme. Das Umweltbundesamt wird zu diesem Themenkomplex ein gesondertes Papier erstellen.



3.2.6 Marine Geo-Engineering Methoden

Die Ozeane sind die größte und wichtigste Kohlenstoffsenke unseres Planeten. Sie nehmen ungefähr 50-mal so viel Kohlenstoff wie die Atmosphäre auf. Gegenwärtig sind im Ozean ungefähr 40.000 Gt Kohlenstoff gespeichert (Atmosphäre nur 750 Gt) (Johnston et al. 1999; Raven and Falkowski 1999). Der größte Teil des Kohlenstoffs ist in der Tiefsee gespeichert (38.100 Gt) (Trumper et al. 2009). Es ist deshalb nicht verwunderlich, dass viele Geo-Engineering-Vorschläge diese wichtige Kohlenstoffsenke nutzen wollen.

Der Austausch von Kohlendioxid zwischen der Atmosphäre und den Ozeanen findet über das Oberflächenwasser statt. Das in der lichtdurchfluteten Wasserschicht gelöste CO_2 wird durch Photosynthese kleinster Algen (Phytoplankton) in Biomasse gebunden. Ein Teil dieser so gebildeten Biomasse (Bruttoprimärproduktion) wird vom Phytoplankton wieder zu CO_2 und Wasser verstoffwechselt, der Rest steht den Konsumenten (Zooplankton – kleinste schwebende Tiere) als Nahrung zur Verfügung. Sterben Phytoplankton und Zooplankton ab, sinken sie in größere Tiefen ab, falls sie nicht vorher als Nahrung dienen. Diesen Abwärtstransport des abgestorbenen, organischen Materials (Detritus) bezeichnet man als biologische Pumpe (Abb. 6). Während ein Teil des so abwärts transportierten organischen Kohlenstoffes durch bakteriellen Abbau für andere Lebewesen wieder verfügbar gemacht wird, sinkt der andere Teil in größere Tiefen ab und ist für einen Zeitraum von bis zu 1.000 Jahren dem Kohlenstoffkreislauf entzogen (Lampitt et al. 2008). Diese Netto-Kohlenstoffaufnahme bezeichnet man als Sequestrierung. Ozeane sind deshalb eine wichtige Senke für CO_2.

Die biologische Pumpe funktioniert umso effektiver, je mehr Nährstoffe dem Phytoplankton für sein Wachstum zur Verfügung stehen. Ein Ansatz des marinen Geo-Engineering zielt deshalb darauf ab, die Effizienz der biologischen Pumpe durch künstliche Nährstoffzufuhr zu steigern (CBD 2009). Dies kann entweder durch die Zufuhr externer Nährstoffe – die Ozeandüngung – erfolgen, oder durch die Verstärkung des Auftriebs von nährstoffreichem Tiefenwasser (Lampitt et al. 2008; Chisholm 2000; Royal Society 2009; Keith 2001).

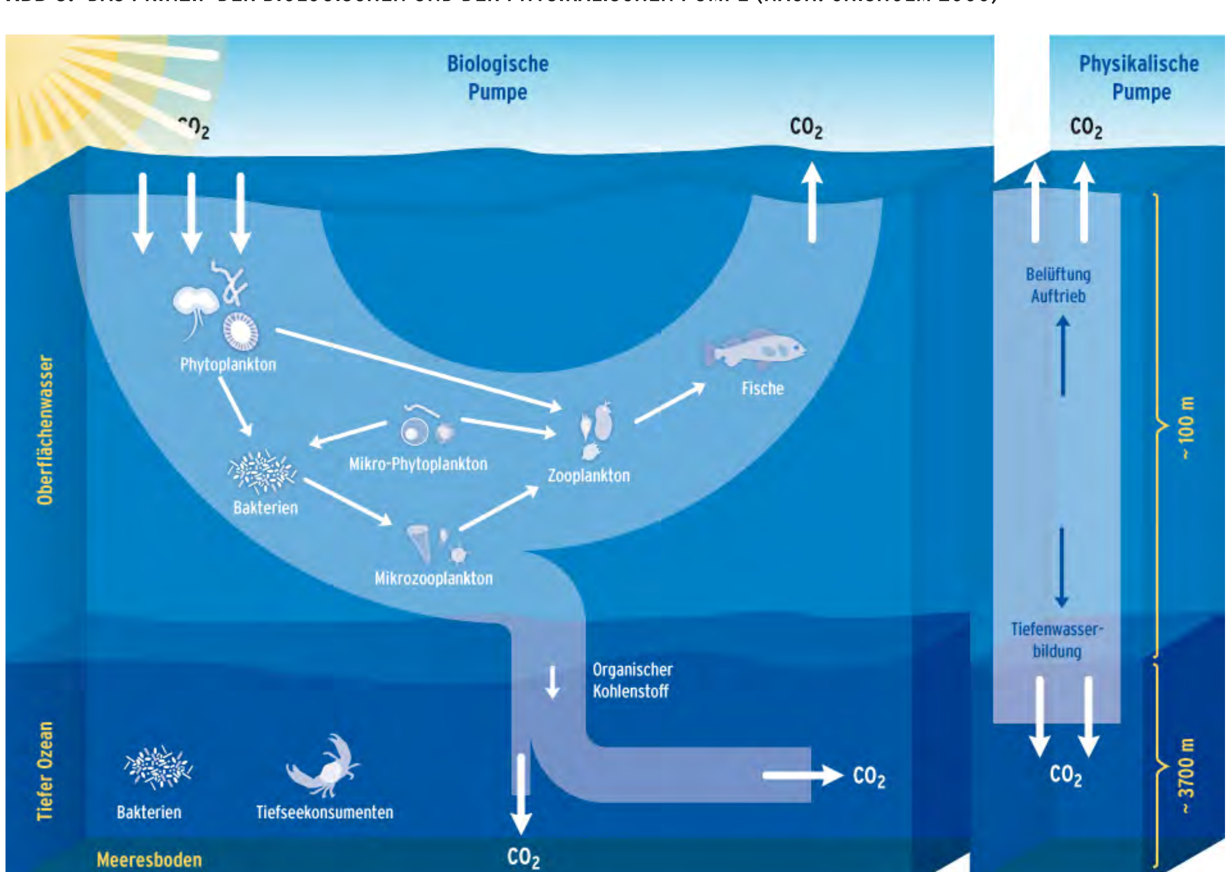
Neben der biologischen Pumpe transportiert ein zweiter Mechanismus – die physikalische Pumpe – CO_2 in die Tiefen des Ozeans (Abb. 6). Diese Pumpe wird durch das Absinken kalter Wassermassen mit hoher Dichte

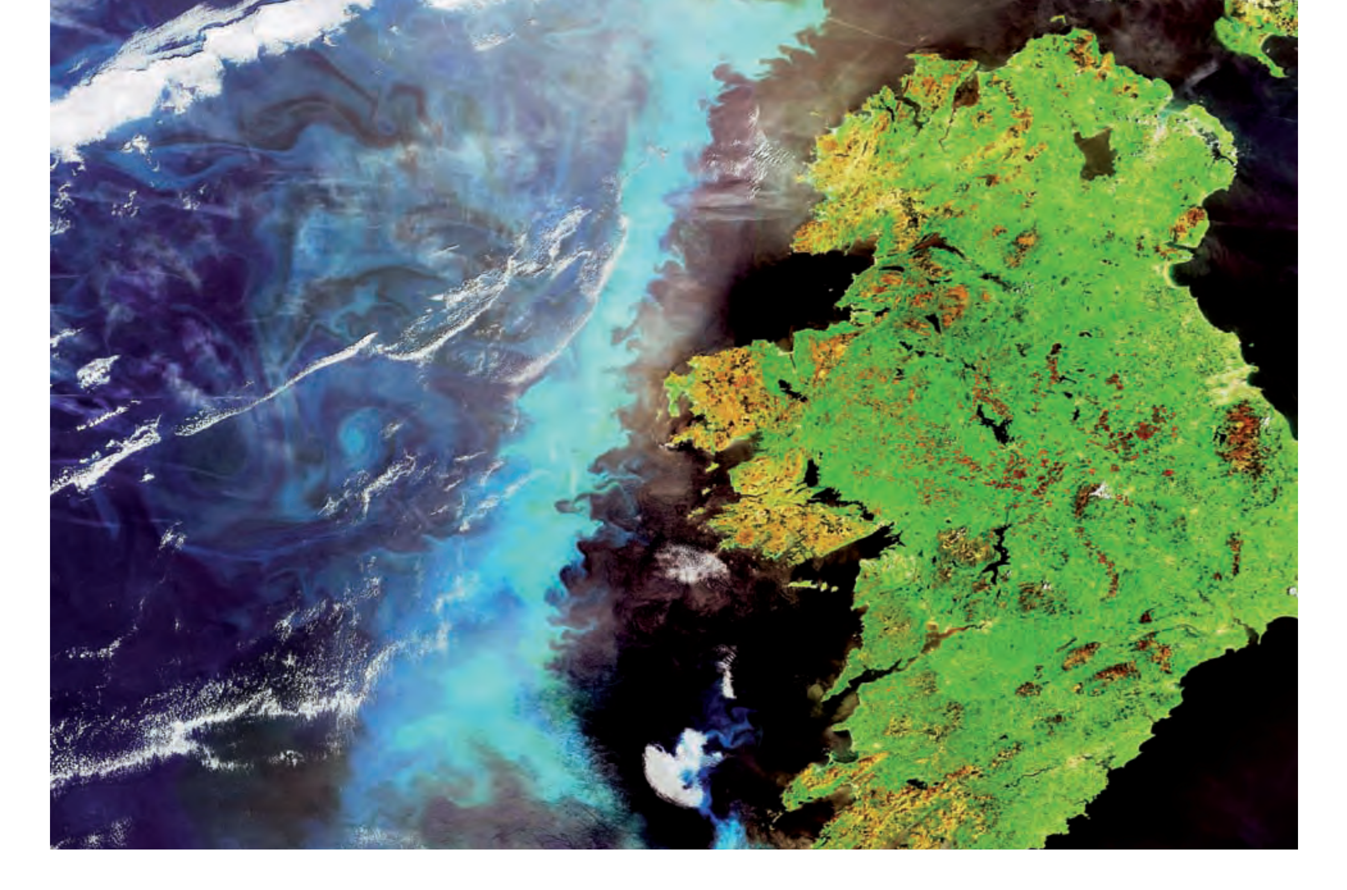
(bedingt durch hohen Salzgehalt) im Nordatlantik und dem Gebiet des antarktischen Zirkumpolarstroms angetrieben. Die absinkenden Wassermassen steigen an anderer Stelle im Ozean wieder auf (Zeitskala 500-1000 Jahre), wodurch globale Meeresströmungen in Gang gesetzt werden. Diese zweite Pumpe wird auch „Löslichkeitspumpe“ genannt, denn sie beruht auf der Abhängigkeit der CO_2-Löslichkeit von der Temperatur. Ein Ansatz des marinen Geo-Engineerings zielt deshalb darauf ab, diese Pumpe zu manipulieren.

07 Ozeandüngung

Das Potenzial der Ozeandüngung zum Entzug von CO_2 aus der Atmosphäre wurde zunächst aufgrund theoretischer Berechnungen als vielversprechend eingeschätzt. Diese zeigten: Eine Leistungssteigerung der biologischen Pumpe um 10 % könnte bis zu 1 GtC/Jahr zusätzlich aus der Atmosphäre entfernen (im Vergleich dazu: Im Jahr 2008 anthropogene CO_2-Freisetzung 8,2 GtC/Jahr). Gelänge es, alle ungenutzten Nährstoffe des Südozeans in den nächsten 100 Jahren in Phytoplanktonbiomasse umzuwandeln (eine extreme Annahme), so könnten 15 % des anthropogenen CO_2-Ausstoßes kompensiert werden (Chisholm et al. 2001). Aufgrund dieses theoretisch hohen Potenzials ist die Ozeandüngung eine Geo-Engineering-Methode, an der bereits seit längerem geforscht wird. Zur Ozeandüngung können sowohl Makronährstoffe wie Phosphor und Stickstoff in großen Mengen als auch – in geringeren Mengen - Mikronährstoffe wie Eisen ins Meer eingebracht werden. Die Wahl hängt davon ab, welchen der Nährstoffe das Phytoplankton in einer bestimmten Region zum Wachstum benötigt. Die Effekte der Ozeandüngung wurden seit 1993 in 13 Freilandexperimenten untersucht, die aber alle räumlich sehr begrenzt waren (< 300 km^2; das entspricht etwa der Stadtfläche Leipzigs) und nur über kurze Zeiträume (< 40 Tage) durchgeführt wurden. Überwiegend wurde Eisen als Dünger verwendet (Nellemann et al. 2009; Royal Society 2009). Schnell zerschlug sich der auf den theoretischen Studien basierende Enthusiasmus, denn die Grundvoraussetzung für die Festlegung von CO_2, das Absinken des Phytoplanktons, trat nicht oder nur in geringem Maße ein. Zunächst bildeten sich zwar großflächige Algenblüten. Diese Phase schwächt sich jedoch schnell ab, da andere Mangelnährstoffe und sonstige Faktoren, wie Atmung oder Lichtmangel sich begrenzend auf das Algenwachstum auswirkten. Ein großer Teil des Phytoplanktons wurde sehr schnell vom Zooplankton gefressen. Eisen wurde durch komplexe chemische Prozesse schnell aus dem Oberflächenwasser entfernt. Ein nennenswerter Nettoexport von CO_2 in die Tiefe konnte in keiner der Studien nachgewiesen werden, u. a. auch aufgrund der Tatsache, dass dieser Export mit den heute zur Verfügung stehenden Methoden schwer messbar ist und die bio-geochemischen Kreisläufe und die Ozeanzirkulation nicht ausreichend erforscht sind (CBD 2009; Royal Society 2009). Auch Modellstudien haben jedoch gezeigt,

ABB 6: DAS PRINZIP DER BIOLOGISCHEN UND DER PHYSIKALISCHEN PUMPE (NACH: CHISHOLM 2000)





dass die Effizienz der Eisendüngung gering ist und der größte Teil des Kohlenstoffes (bis zu 80 %) wieder freigesetzt wird (CBD 2009; Lampitt et al. 2008). Über die Düngung mit Makronährstoffen wie Phosphor und Stickstoff liegen zurzeit nur wenige wissenschaftliche Erkenntnisse vor (CBD 2009). Somit ist ein Nachweis für die Wirksamkeit der Ozeandüngung bislang nicht erbracht.

Zu bedenken ist, dass eine enorme Fläche gedüngt werden müsste. Ferner würde die Wirkung der Ozeandüngung erst sehr langsam einsetzen, da das Phytoplankton nur sehr langsam in die Tiefe absinkt und es darüber hinaus eine Verzögerung gibt zwischen veränderter CO_2-Konzentration der Atmosphäre und der Veränderung der globalen Mitteltemperatur. Die Düngung müsste auch über sehr lange Zeiträume aufrecht erhalten werden, um den atmosphärischen CO_2-Gehalt nachhaltig zu beeinflussen (Lenton & Vaughan 2009). Von der potenziell gespeicherten Menge an CO_2 muss auch das CO_2 abgezogen werden, das bei der Herstellung des Düngers, beim Transport und bei der Ausbringung entsteht. Diese Menge könnte eventuell größer sein als das festgelegte CO_2 (Lampitt et al. 2008). Während einige Wissenschaftler (Strong et al. 2009) nach 18 Jahren Experimenten den Beweis für die Ineffizienz der Methode als erbracht sehen, fordern andere zukünftige großskalige Feldexperimente (100 x 100 km), gekoppelt an hochauflösende dreidimensionale Computermodelle (Güssow et al. 2010; Lampitt et al. 2008).

Neben der überaus fraglichen Wirksamkeit der Methode sind unerwünschte Auswirkungen auf die Meeresumwelt sehr wahrscheinlich, denn die Ozeandüngung greift in die sehr komplexe Struktur ozeanischer Nahrungsnetze ein. Nicht kalkulierbar sind derzeit die ökologischen Folgekosten etwa der Eutrophierung (übermäßige Nährstoffanreicherung) und veränderter Nahrungsnetze. Eine erhöhte Nährstoffzufuhr verändert die Zusammensetzung des Phytoplanktons und wirkt sich auf das gesamte Nahrungsnetz aus. Auch toxische Algenblüten können sich bilden, eine Gefahr für Menschen und Meerestiere. In einer erst kürzlich veröffentlichten Studie wurde gezeigt, dass die Eisendüngung im subarktischen Pazifik zu Blüten von Kieselalgen führt, die ein starkes Nervengift produzieren (Trickt et al. 2010). Diese Algengattung trat in den meisten Düngungsexperimenten auf, aber die Produktion des Toxins wurde bisher nicht gemessen. Das Gift reichert sich in der Nahrungskette an und führt beim Menschen nach dem Verzehr kontaminierter Schalentiere zu Vergiftungen. Weitere negative Folgen entstehen durch das Absinken großer Mengen abgestorbenen Phyto- und Zooplanktons, die bei Akkumulation am Meeresgrund langfristig zu Sauerstoffmangel in den jeweiligen Kompartimenten führen können und zum Absterben der Organismen am Meeresboden und in der Wassersäule. Sauerstofffreie Sedimente produzieren wiederum Treibhausgase wie Methan, die den Effekt der CO_2-Reduktion zunichte machen können.

Schließlich sind mögliche negative Effekte in den dem Düngebereich nachgelagerten Regionen, „stromabwärts“, zu betrachten. Sie werden über die Meeresströmungen mit Wassermassen versorgt, denen bereits für das Phytoplanktonwachstum essentielle Nährstoffe (die nicht im Dünger enthalten sind) entzogen wurden. Die Folge des Nährstoffentzugs könnte sein, dass es nur zu einer örtlichen Verlagerung der Algenbiomasseproduktion kommt. Es ist deshalb nötig, den Kohlenstoffkreis-

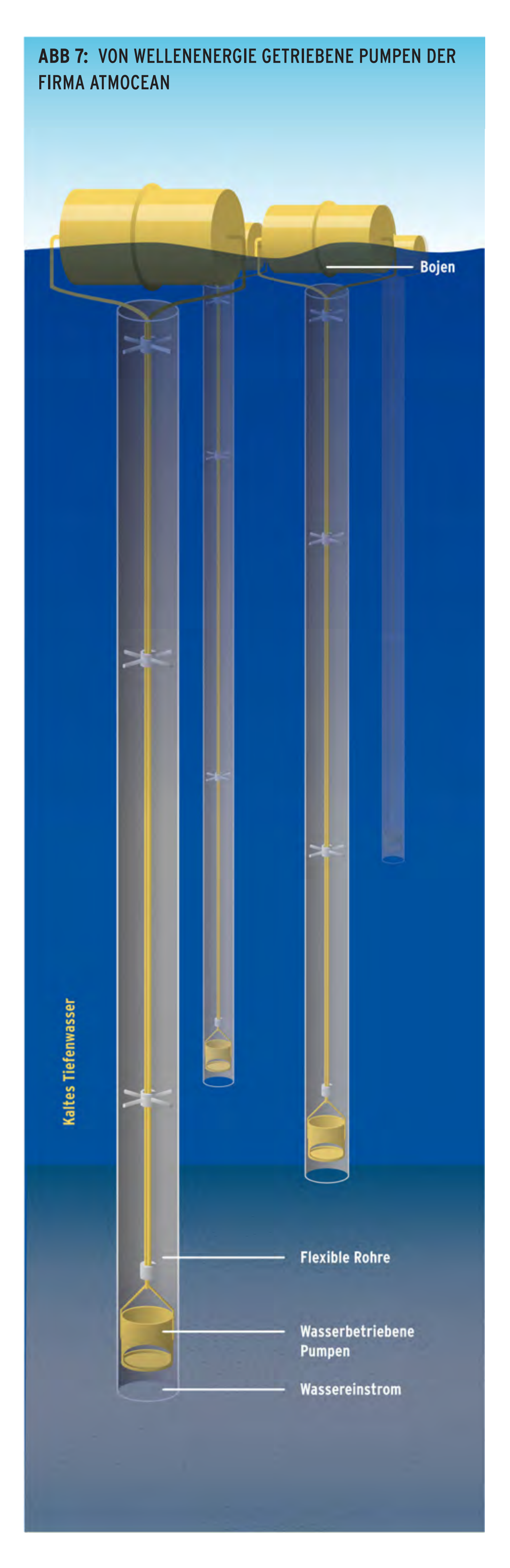
lauf einer viel größeren Region in die Untersuchung mit einzubeziehen (CBD 2009; MacCracken 2009). Die Vielzahl ungeklärter Nebenwirkungen ist der Grund dafür, dass bereits 2008 im Rahmen des globalen London-Übereinkommens Beschlüsse gefasst wurden, um die kommerzielle Düngung zu verbieten (siehe Kapitel 4.6). Letztendlich steht die durch Ozeandüngung herbeigeführte Eutrophierung auch im Widerspruch zur globalen, europäischen und regionalen Meeresschutzpolitik, mit der das Ziel verfolgt wird, die Eutrophierung zu reduzieren und einen „guten Meereszustand" zu erreichen (Leujak et al. 2010).

08 Manipulation der marinen Schichtung

In den Ozeanen überlagern Schichten wärmeren Wassers Schichten mit kaltem Tiefenwasser. Diese Schichtung verhindert weitgehend eine Durchmischung des Meeres. Die bewusste Manipulation dieser marinen Schichtung könnte dazu dienen, nährstoffreiches Tiefenwasser an die Oberfläche zu befördern und dadurch die biologische Pumpe zu steigern oder durch eine Verstärkung des Absinkens von Wassermassen die physikalische Pumpe zu verstärken. Lovelock & Rapley (2007) schlagen vor, den Auftrieb nährstoffreichen Tiefenwassers mit vertikalen Pumpen zu fördern. Diese 100 – 200 m langen vertikalen Röhren mit einem Durchmesser von 10 m nutzen die Wellenenergie, um das Wasser aus der Tiefe nach oben zu pumpen. 21 Prototypen wurden bereits von der amerikanischen Firma Atmocean Inc. (www.atmocean.com) getestet (Abb.7). Aus der Tiefe an die Oberfläche befördertes Tiefenwasser ist allerdings schon mit CO_2 angereichert und kann deshalb weniger CO_2 aufnehmen bzw. dieses in bestimmten Meeresregionen sogar an die Atmosphäre abgeben (Shepperd et al. 2007). Da ein Auftrieb nährstoffreichen Tiefenwassers dem System keine zusätzlichen Nährstoffe hinzufügt, ist die zu erwartende Effizienz dieser Methode deutlich geringer als die Effizienz anderer Methoden der Ozeandüngung, die externe Nährstoffe einbringen. Um die CO_2-Aufnahme der Ozeane um nur 1 GtC/Jahr zu steigern, würden in Abhängigkeit von der Effizienz 200 – 800 Millionen Pumpen benötigt, die eine Fläche von bis zu 1.000 km^2 (Fläche Berlins: ca. 900 km^2) bedecken würden (Yool et al. 2009, Lampitt et al. 2008). Da die Methode auf eine Steigerung des Algenwachstums abzielt, sind prinzipiell dieselben Nebenwirkungen wie bei den anderen Methoden der Ozeandüngung zu erwarten. Die Installation und der Betrieb der Pumpen im Meer könnten zudem die Meeresorganismen durch Lärm und Hindernisse beeinträchtigen. Die Methode steht auch in Konkurrenz zu Fischerei, Schifffahrt, dem Tourismus und anderen Meeresnutzungen - und würde zudem ein Sicherheitsrisiko für diverse Nutzungen bergen (Schifffahrt, Fischerei, Militär).

Neben Vorschlägen, die auf eine Steigerung des Algenwachstums setzen, gibt es weitere, die die physikalische

ABB 7: VON WELLENENERGIE GETRIEBENE PUMPEN DER FIRMA ATMOCEAN



Pumpe manipulieren wollen, um CO_2 dauerhaft in große Meerestiefen zu befördern. Dabei soll versucht werden, entweder die CO_2-Konzentration von Wassermassen künstlich zu erhöhen oder das absinkende Wasservolumen zu steigern. Zhou & Flynn (2005) evaluierten sieben Methoden, wobei sich herausstellte, dass die Erhöhung der CO_2-Konzentration von Wassermassen nicht praktikabel ist, da das Oberflächenwasser schon mit CO_2 gesättigt ist.

Nur eine Methode erwies sich als durchführbar und bezahlbar – die künstliche Bildung von Meereis durch das Aufsprühen von Wasser auf bereits bestehende Meereisschilde. Diese verdickten Eisschilde können dann die darunterliegenden Wassermassen stärker abkühlen. Kühlere Wassermassen sind schwerer, so dass vermehrt Wasser in die Tiefe absinkt. Zu berücksichtigen ist allerdings, dass das Absinken von Wassermassen in einer Region den Auftrieb von Wassermassen in einer anderen Region zur Folge hat, so dass es schwierig ist, die Kohlendioxidbilanz der Methode zu schätzen. Darüber hinaus müsste erst einmal die 10-prozentige Abschwächung der physikalischen Pumpe, die infolge des Klimawandels durch eine Abnahme der Löslichkeit von CO_2 im wärmeren Oberflächenwasser auftritt, kompensiert werden (Körtzinger 2010). Es ist gleichfalls davon auszugehen, dass ein derartiger Eingriff durch die Änderung der Temperaturverhältnisse und der Hydrodynamik erhebliche negative Auswirkungen auf die Meeresorganismen und die komplexen marinen Nahrungsnetze zur Folge haben könnte.

Zhou & Flynn (2005) kommen zu dem Schluss, dass diese Geo-Engineering-Methode wahrscheinlich viel teurer als andere Methoden ist (Kosten 177 US$ pro t CO_2), und bewerten sie deshalb auch als unpraktikabel. Die Methode ist trotzdem weiter in der Diskussion, da man mit ihrer Hilfe möglicherweise den sich durch den Klimawandel eventuell abschwächenden Nordatlantikstrom (Teil der Golfstromzirkulation) wieder verstärken könnte. Negative Auswirkungen wurden bisher von keiner Studie diskutiert, sind aber nicht zu vernachlässigen, da es sich um Eingriffe in hoch komplexe Zirkulationsprozesse der Ozeane handelt, die das Klima auf der Erde maßgeblich beeinflussen.

09 Ozeankalkung

Die Ozeankalkung hat ebenfalls das Ziel, die physikalische oder Löslichkeitspumpe zu verstärken, indem der pH-Wert des Meerwassers durch die Zugabe von Kalziumoxid erhöht wird. Stärker basisches Meerwasser könnte dann mehr CO_2 aus der Luft binden. Dazu müsste Kalziumoxid zunächst an Land durch die thermische Zersetzung (Erhitzung auf 850° C) von Kalkstein gewonnen werden. Ein Prozess, der viel Energie und Wasser benötigt und zudem Kohlendioxid freisetzt. Befürworter argumentieren, dass die Menge des freigesetzten CO_2 nur halb so groß sei wie die Menge, die später im gekalkten Ozean gebunden werde (Kruger 2010). Die Methode wurde erstmals von Kheshgi (1995) vorgeschlagen, wird momentan hauptsächlich von dem Briten Tim Kruger propagiert und soll über eine Internetseite durch die Beteiligung der Öffentlichkeit weiterentwickelt werden (www.cquestrate.com). Forschung zur Durchführbarkeit des Ansatzes, die auch die Folgen für marine Ökosysteme betrachtet, wird von Shell finanziert (Borel 2008). Grobe Schätzungen zeigen, dass 1,5 km^3 Kalkstein 1 Gt CO_2 im Ozean festlegen könnten. Es würde aber 750 Jahre dauern, bis der gegenwärtige CO_2-Gehalt der Atmosphäre auf natürliche Konzentrationen abgesenkt wäre, vorausgesetzt, dass pro Jahr 1 km^3 Kalkstein abgebaut wird (Borel 2008). Logistisch stellt die Ozeankalkung einen enormen Aufwand dar, da sehr große Mengen an Kalkstein abgebaut und transportiert werden müssten. Kruger argumentiert, dass seine Methode auch in der Lage wäre, die durch den Klimawandel bedingte Ozeanversauerung zu mildern. Dies ist jedoch fraglich, da eine lokale Kalkung den pH-Wert nur in einem begrenzten Gebiet ansteigen lässt. Ferner könnte das extrem basische Wasser bei der Einbringung sogar Meeresorganismen schädigen.

Kritiker halten schon den Ansatz für unplausibel, da die lokale Einbringung von Kalziumoxid das Meerwasser so basisch machen würde, dass es wahrscheinlich sofort zur Ausfällung von Kalziumkarbonat käme. Selbst wenn dies nicht der Fall sein sollte, argumentieren Wissenschaftler, dass die im Ozean gebundene Menge an CO_2 die Menge, die bei der Zersetzung des Kalksteins frei wird, nicht wesentlich übersteige und damit der gesamte Prozess eher zusätzliches CO_2 produzieren würde. Kalk müsste also in erheblichen Mengen ins Meer einbracht werden, um eine nennenswerte Erhöhung des Kalkgehaltes im Meerwasser zu erreichen. Da aber das Oberflächenwasser der Ozeane mit Kalk übersättigt ist, würde dies zu keiner beschleunigten Lösung von CO_2 im Meerwasser führen. Eine Untersättigung mit Kalk liegt erst in Tiefen von mehreren tausend Metern vor. Dort ist aber bisher nur wenig anthropogenes CO_2 angekommen. Das befindet sich größtenteils noch in den oberen Ozeanschichten und wird erst in 1.000 – 2.000 Jahren über die gesamte Wassersäule verteilt sein. Langfristig (in 10.000 und mehr Jahren) wird genau diese Reaktion den größten Teil des anthropogenen CO_2 binden. Dafür ist der natürliche Kalkgehalt in den Meeren ausreichend (es sei denn, die globale CO_2-Produktion übersteigt 5.000 Gt C). Darüber hinaus wären die negativen Auswirkungen einer Kalkung auf die marinen Ökosysteme zu berücksichtigen. Das Lichtklima der Meere würde sich durch gewaltige Trübungszonen verändern, in denen Photosynthese betreibende Pflanzen nicht mehr wachsen könnten. Dies hätte Auswirkungen auf die Nahrungsnetze und die Fischereierträge.

10

Versenkung von Ernteabfällen

Neben Vorschlägen zur direkten Speicherung von CO_2 in marinen geologischen Schichten (CCS, siehe Kapitel 3.2.1) kursiert auch der Vorschlag, Ernteabfälle im Meer zu versenken. Dieser Vorschlag (Strand und Benford 2009, siehe auch Kapitel 3.2.3) wird als CROPS – Crop Residue Permanent Sequestration – bezeichnet. Strand und Benford gehen davon aus, dass ungefähr 30 % der Ernteabfälle (z. B. Stroh) von den Äckern entfernt werden könnten, ohne dass die Bodenqualität gemindert wird und die Bodenerosion sich verstärkt. Die Ernteabfälle würden zu Ballen gebündelt und mit der schon bestehenden Infrastruktur (Erntemaschinen, Lastwagen) zum nächsten Hafen transportiert, auf Schiffe verladen und an Stellen, wo der Ozean mehr als 1000 - 1500 m tief ist, nach Beschweren der Ballen mit Steinen versenkt.

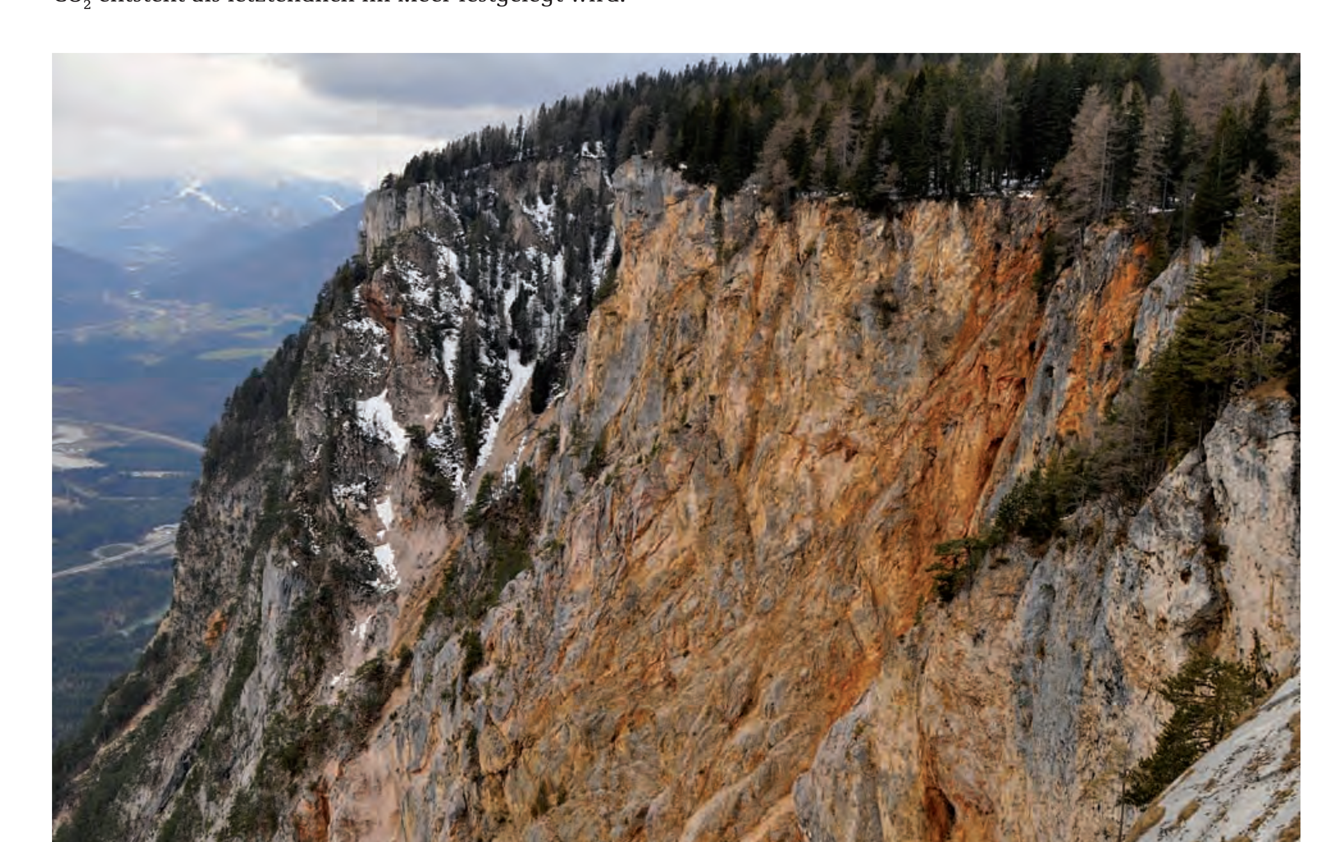
Autoren des Vorschlages nehmen an, dass in diesen Tiefen aufgrund der Kälte, des Sauerstoffmangels und des Fehlens von Enzymen zum Zelluloseabbau eine Zersetzung des organischen Materials durch marine Bakterien nur sehr langsam stattfindet und dass das CO_2 so bis zu tausenden von Jahren festgelegt wäre. Sie schätzen ab, dass durch das Versenken von Ernteabfällen 92 % des darin enthaltenen CO_2 festgelegt werden, während dieser Prozentsatz bei der Herstellung von Ethanol als Treibstoff aus den Abfällen nur bei 32 % und für das Vergraben der Abfälle im Boden bei 14 % liegt. Erste Kosten-Nutzen Abschätzungen zeigen, dass die Festlegung einer Tonne Kohlenstoff 340 US$ kosten würde, und dass im globalen Maßstab ungefähr 15 % der jährlichen globalen Zunahme des CO_2-Ausstoßes (0,6 – 0,9 Gt CO_2) durch diese Methode aus der Atmosphäre entfernt werden könnten. Es müsste aber gewährleistet werden, dass durch den Transport der Ernteabfälle nicht mehr CO_2 entsteht als letztendlich im Meer festgelegt wird.

Über die ökologischen Auswirkungen dieser Methode kann nur spekuliert werden, da Tiefseeprozesse weitestgehend unerforscht sind. Strand und Benford (2009) schlagen vor, Ernteabfälle nur dort zu deponieren, wo bereits durch natürliche Prozesse terrestrische Biomasse in größeren Meerestiefen abgelagert wird. Die betroffene Ozeanfläche sollte durch Schichtung der Ballen begrenzt werden (Ablagerung von bis zu 4 m starker Schicht jährlich). Negative Auswirkungen dieser Methode auf die komplexen Meeresökosysteme sind sehr wahrscheinlich. Fragile Tiefseeökosysteme - zumindest an den Ablagerungsorten - werden zerstört. Offen bleibt, ob Zersetzungsprozesse zur Freisetzung schädlicher Stoffe (Faulgase, Treibhausgase) führen und die Meeresorganismen in einer größeren Region signifikant beeinträchtigen können, mit unvorhersehbaren Folgen auch für den Menschen. Sollten sich die Ballen von ihrem Anker lösen und an die Oberfläche treiben, kommt es durch Zersetzungsprozesse zur Freisetzung des gebundenen CO_2. An Land würden durch das Entfernen der Ernteabfälle von den Äckern den Böden wichtige Nähr- und Spurenstoffe entzogen.

11

3.2.7 Nutzung der Prozesse bei der Verwitterung (terrestrische und marine Methoden)

Nicht nur Wälder speichern Kohlendioxid, CO_2 wird auch durch natürliche Verwitterungsprozesse aus der Atmosphäre entfernt. Bei der Verwitterung werden Silikatgesteine unter Einwirkung von Kohlensäure, die durch Lösung von CO_2 in Regen- oder Bodenwasser gebildet wird, aufgelöst. Dabei entsteht lösliches Kalziumkarbonat, das über die Flüsse ins Meer gelangt. Die Verwitterung beeinflusst in erheblichem Maße die CO_2-Konzentration der Atmosphäre und der Ozeane. Sie läuft aber nur sehr langsam ab. Es werden nur 0,1 Gt C pro Jahr gebunden (Royal Society 2009).



Überlegt wird, diese Verwitterungsprozesse nachzuahmen oder zu beschleunigen. Die nötigen Ausgangsstoffe wären in großen Mengen vorhanden. Zunächst müssten geeignete Mineralien aus dem Berg- oder Tagebau so aufbereitet werden, dass sie eine möglichst große Oberfläche aufweisen.

Verschiedene Methoden zur Beschleunigung der Verwitterung werden diskutiert. Eine sieht vor, Silikatmineralien (zum Beispiel Olivin – basisches Mineralgestein) in landwirtschaftliche Böden einzubringen. Dort sollen sie nach der Aufnahme von CO_2 zu festen karbonathaltigen Mineralien und löslichem Bikarbonat verwittern. Erforderlich wären große Mengen an Silikatmaterial: Nach Schätzungen würden etwa 7 km^3 Silikatmineralien pro Jahr die jährlichen CO_2-Emissionen binden (Royal Society 2009). Diese Menge an Silikatmineralien entspricht etwa dem Doppelten der gegenwärtigen weltweiten Kohleförderung pro Jahr.

Ferner gibt es Vorschläge, durch das gezielte Einbringen von CO_2 in die Erdkruste eine Beschleunigung der Reaktion mit Basalten oder Olivinen (basisches Mineralgestein) zu erzielen (Royal Society 2009). In Oman existieren besondere Gesteinsformationen, die aus Peridotit, einem olivinhaltigen Gestein, bestehen, das sehr schnell verwittert und große Mengen an CO_2 bindet (Kelemen & Matter 2008). Diese Verwitterung könnte man dadurch beschleunigen, dass man heißes CO_2-Gas unter hohem Druck über Bohrungen ins Gestein einbringt. Dieser Prozess könnte mehr als 1 Gt CO_2 (0,27 Gt C) pro Jahr speichern und würde ohne den Transport großer Mengen an Gestein auskommen. Im Unterschied zu den ex-situ Methoden würde wahrscheinlich auch weniger Energie benötigt.

Bei der so genannten ‚Karbonatlösungstechnik' sollen CO_2-Abgase aus Kraftwerken in chemische Werke geleitet werden, wo sie mit Kalkstein unter CO_2-Verbrauch zu löslichem Bikarbonat reagieren (Caldeira & Rau 1999, 2000). Die resultierenden Endprodukte, Kalziumionen und Bikarbonat, würden ins Oberflächenwasser der Meere eingeleitet werden, wo CO_2 in dieser chemischen Form kaum noch mit der Atmosphäre ausgetauscht werden kann (< 15 % des CO_2 werden durch Ausgasung wieder an die Atmosphäre abgegeben). Es ist allerdings technisch nicht möglich, CO_2 vollständig aus den Abgasen zu entfernen. Schätzungen ergeben, dass 2,3 t Kalkstein und 0,3 t Wasser benötigt werden, um 1 t CO_2 zu binden, wobei 2,8 t HCO_3- (Bikarbonat-Ionen) entstehen (Rau et al. 2001). Das Wasser könnte dabei größtenteils aus dem Kühlwasserkreislauf von Kohlekraftwerken stammen. Die Einleitung des Bikarbonats in die Ozeane würde zur Versauerung führen, die aber sechsmal geringer ausfällt als die Versauerung infolge des Klimawandels (Caldeira & Rau 2000). Nach Caldeira & Rau wäre eine enorme Infrastruktur erforderlich, um den Kalkstein abzubauen, zu transportieren, zu zerkleinern und zu lösen sowie um die Endprodukte abzupumpen. Ökonomisch wettbewerbsfähig wäre die Technik vor allem dort, wo Kalklagerstätten in Meeresnähe vorkommen. Erste Kostenabschätzungen liegen, abhängig von den Transportkosten, bei 6 – 68 US$ pro Tonne gebundenen Kohlenstoffs. Die Berechnungen gehen allerdings davon aus, dass Wasser kostenlos zur Verfügung steht (Rau et al. 2001; Caldeira & Rau 2000).

Darüber hinaus kursiert die Idee, starke Basen, wie Kalziumhydroxid, in die Ozeane einzuleiten. Diese würden mit CO_2 unter Bildung von Kalziumionen und Bikarbonat (Royal Society 2009) reagieren. Problematisch ist bei dieser Methode jedoch, dass starke Basen in der Natur nicht in ausreichender Menge vorkommen und erst synthetisiert werden müssten. Bei dieser Synthese entstehen jedoch starke Säuren, und es ist unklar, wie diese entsorgt werden sollen. Eine weitere marine Methode, die Ozeankalkung, wurde schon in Kapitel 4.2.6. erläutert.

Alle erwähnten Vorschläge sind technisch und chemisch machbar, ihr Einsatz in der nötigen Größenordnung aber aus verschiedenen Gründen begrenzt. Im günstigsten Reaktionsverhältnis müsste mindestens eine Tonne Silikatgestein aufgewendet werden, um eine Tonne CO_2 zu binden (Royal Society 2009). Es wäre also eine gigantische Menge an Ausgangsgestein erforderlich. Der nötige Ausbau der Bergbautätigkeiten, die Aufbereitung und der Transport wären zum einen sehr kosten- und energieintensiv, zum anderen würden erhebliche lokale Umweltschäden verursacht (Royal Society 2009). Das Anfallen größerer Mengen basisch wirkender Endprodukte birgt weitere Risiken. Zwar wird angenommen, dass die Einleitung dieser Endprodukte ins Meer geringe Auswirkungen hat, da diese Substanzen bereits in sehr großen Mengen im Meer vorhanden sind. Es wird sogar darauf verwiesen, dass ein Anstieg des pH-Wertes der Ozeane der durch den Klimawandel bedingten Versauerung entgegenwirkt. Dabei wird jedoch übersehen, dass eine lokal stark konzentrierte Freisetzung beträchtliche Auswirkungen auf den pH-Wert der betroffenen Regionen hat. Damit einhergehende Auswirkungen auf die Ozeanchemie sind nicht abschätzbar. Auch der enorme Wasserbedarf, der bei einigen Methoden entsteht, begrenzt die Anwendung und ist vor dem Hintergrund zu erwartender weltweiter Wasserknappheit zu prüfen.

3.2.8 Zusammenfassung und Bewertung von Methoden zur Festlegung von CO_2

Prinzipiell setzt der Entzug von Kohlendioxid aus der Atmosphäre näher an der Ursache der Klimaerwärmung an als die Methoden zur Beeinflussung des Strahlungshaushaltes. Denn immerhin wird versucht, den Anstieg des CO_2 in der Atmosphäre zu vermindern. Da-

mit wird zugleich der fortschreitenden Versauerung der Ozeane – ein gravierendes Problem im Zusammenhang mit der anthropogenen Erwärmung- entgegengewirkt. Bei marinen Geo-Engineering-Methoden gilt das zum Teil nicht, weil die Versauerung der Meere zumindest potenziell verstärkt wird. Zudem reduziert der Entzug von Kohlendioxid nur eben dieses Treibhausgas. Alle anderen (zum Beispiel Lachgas) bleiben unberücksichtigt.

Generell kann man sagen, dass die Methoden zur Beeinflussung des Strahlungshaushaltes schneller einen relevanten Effekt in Bezug auf den Klimawandel haben können als diejenigen zur Festlegung von CO_2. Die Speicherung von CO_2 verlangt in der Regel einen großen technischen, ökonomischen und auch zeitlichen Aufwand.

In Anbetracht des hohen, durch den Menschen verursachten Jahresausstoßes an CO_2 müssten der Atmosphäre enorme Mengen an Kohlendioxid entzogen werden, um einen merklichen Effekt auf das Klima zu erzielen. Die Wirksamkeit einer Reihe von Maßnahmen zur Speicherung von CO_2 ist durch den hohen Energieaufwand für die Errichtung, den Betrieb und die Wartung der nötigen Infrastruktur fraglich.

Die Wirksamkeit eines Teiles der Maßnahmen zur Speicherung von CO_2 basiert darauf, dass das der Atmosphäre entzogene CO_2 nachweislich für lange Zeiträume gespeichert wird. Das Speichermedium muß so beschaffen sein, dass CO_2 auf lange Zeit nicht in die Atmosphäre entweichen kann. Grenzen werden also unmittelbar durch tatsächlich verfügbare, geeignete Speicherräume gesetzt. Zu berücksichtigen ist, dass nachhaltige Ansätze zur Nutzung des Untergrundes, wie Geothermie, nicht beeinträchtigt werden dürfen und hierdurch die Zahl verfügbarer Speicher weiter eingeschränkt wird.

Die Methoden unterscheiden sich darüber hinaus sehr stark in den mit ihnen verbundenen Risiken. Beispielsweise bietet die Verwendung standortgerechter Baumarten bei der Wiederbewaldung und die Anwendung nachhaltiger naturnaher Bewirtschaftungsformen neben dem positiven Beitrag zum Klimaschutz zusätzlich ökologische Vorteile.

Die marinen Methoden des Geo-Engineering sind zum Teil mit großen Eingriffen in die natürlichen Prozesse der Ozeane verbunden. Das betrifft unter anderem Eingriffe in die komplexe Struktur ozeanischer Nahrungsnetze sowie Eingriffe in ozeanische Zirkulationssysteme. Die Folgen können derzeit in keiner Form ausreichend vorhergesehen oder beurteilt werden. Zudem ist die Wirksamkeit der fraglichen Maßnahmen wegen des erforderlichen Aufwandes in den meisten Fällen gering.

Generell ist auszuführen, dass die meisten dieser beschriebenen marinen Methoden, die auf dem Einbringen von Stoffen in die Meere beruhen, in krassem Widerspruch zur globalen, regionalen und nationalen Meerespolitik der letzten Dekaden stehen. Es ist gelungen, Übereinkommen zu erreichen oder bestehende zu verändern, die das Versenken (Dumping) von Stoffen und Materialien verbieten oder zumindest massiv einschränken. Damit wird dem Erfordernis Rechnung getragen, unsere sensiblen Meeresökosysteme zu schützen, um von ihren natürlichen Funktionen profitieren zu können und eine nachhaltige Nutzung zu ermöglichen. Die oben aufgeführten Vorschläge bedeuten einen Paradigmenwechsel im Meeresschutz, der aus unserer Sicht deutlich mehr Schaden anrichtet, als er Nutzen hat.

Methoden zur Ozeandüngung nehmen eine gewisse Sonderstellung ein, denn sie wurden bereits im Freiland getestet. Forschungsergebnisse zeigen hier deutlich, dass die Wirksamkeit dieser Methoden gering ist und dass mit negativen Auswirkungen auf die Meeresumwelt zu rechnen ist.

Für eine abschließende Bewertung der Wirkungen und Folgen der Vorschläge zur Bindung von Kohlendioxid liegen keine ausreichenden Erkenntnisse vor. Bislang ist keiner der Vorschläge hinreichend entwickelt und ausgereift, und es gibt fast keine Beispiele für eine praktische Umsetzung. Bei einigen dieser Methoden muss damit gerechnet werden, dass der erforderliche Aufwand an Energie und Logistik in keinem sinnvollen Verhältnis zum Effekt steht.

Zuletzt muss insbesondere bei terrestrischen Maßnahmen berücksichtigt werden, dass sie den Betroffenen, z. B. Anwohnern, vermittelt werden müssen.

FUSSNOTEN:

4 Aerosole sind kleine, schwebende Teilchen oder Tröpfchen.

5 1 Terragramm = 1 Million Tonnen.

6 Terra Preta: Schwarze Erde; So nennt man dunklen, fruchtbaren Boden im Amazonas Becken mit hohem Holzkohlenanteil. Es wird angenommen, dass die Indios Holzkohle diesem Boden zugefügt haben.

7 Eine negative CO_2-Bilanz bedeutet, dass im Gesamtprozess der Atmosphäre mehr CO_2 entzogen wird, als emittiert wird. Möglich ist dies, weil Pflanzen während ihrer Wachstumsphase der Atmosphäre CO_2 entziehen. Bei der Verbrennung der Pflanzen im Biomassekraftwerk wird das CO_2 zwar wieder frei gesetzt, durch Abscheidung und dauerhafte Speicherung besteht jedoch die Möglichkeit, einen Teil dieses CO_2 aus der Atmosphäre zu entfernen.



04 RECHTLICHER RAHMEN

4.1 Rechtsfragen des Geo-Engineering

Die vorangegangene Vorstellung der verschiedenen Vorschläge für Geo-Engineering zeigt, dass diese teilweise erhebliche Eingriffe in die Erdsysteme bedeuten und potenziell Risiken für die globale Umwelt bergen. Vor diesem Hintergrund ist zu untersuchen, inwieweit die Anwendung und die Erforschung von Geo-Engineering einer rechtlichen Steuerung unterliegen.

Rechtliche Steuerungsinstrumente können auf verschiedenen Ebenen der Regulierung ansetzen. Einzelne Staaten können bestimmte Geo-Engineering-Maßnahmen fördern, genehmigen oder verbieten. Die jeweiligen nationalen Regelungen sind Ergebnis der politischen Strategien der einzelnen Staaten. Diese können hier schon auf Grund der Vielzahl nicht nachgezeichnet werden.

Daneben ergeben sich rechtliche Vorgaben aus dem internationalen Recht. Diese Vorschriften sind angesichts der globalen Dimension von Geo-Engineering deshalb bedeutsam, weil sie die einzelnen Staaten binden.

Völkerrechtliche Verpflichtungen ergeben sich im Wesentlichen aus internationalen Verträgen und Völkergewohnheitsrecht. Völkergewohnheitsrecht sind ungeschriebene Normen, die durch eine Staatenpraxis, die von einer Überzeugung der Rechtsverbindlichkeit getragen ist, entstehen. Regeln des Völkergewohnheitsrechts können – je nach Teilnahme der Staaten an einer entsprechenden Staatenpraxis – globale oder auch nur regionale Geltung haben. Darüber hinaus besteht eine Vielzahl von internationalen Verträgen, die lediglich für die jeweiligen Vertragsstaaten Verpflichtungen auslösen. Bevor die Einzelheiten erläutert werden, ist darauf hinzuweisen, dass Geo-Engineering-Maßnahmen zumindest zum Teil auf sich in der Entwicklung befindenden Technologien („evolving technologies“) basieren. Das hat zur Folge, dass die internationalen Regelungen oftmals nicht mit Blick auf diese Technologien konzipiert wurden, weil es solche Techniken bei Vertragsschluss nicht gab. Daher besteht ggf. Anpassungsbedarf.

Geo-Engineering-Technologien sollen den vom Menschen gemachten Klimawandel bekämpfen. Daher ist zunächst zu prüfen, ob sich im internationalen Klimaschutzrecht einschlägige Bestimmungen finden. Daneben werden aber auch spezielle Verträge sowie das Völkergewohnheitsrecht bezogen auf die verschiedenen Geo-Engineering-Maßnahmen erörtert. Abschließend werden Aspekte in Bezug auf einen zukünftigen Rechtsrahmen diskutiert.

4.2 Internationales Klimaschutzrecht

Spezifische Vorgaben zu Geo-Engineering-Technologien enthält das internationale Klimaschutzrecht nicht. Der Basisvertrag des internationalen Klimaschutzrechts, die Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen von 1992[8], formuliert allerdings als Ziel des internationalen Klimaschutzes, dass die Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre stabilisiert wird, um eine gefährliche Störung des Klimasystems zu verhindern. Bei den Maßnahmen zur Erreichung dieses Ziels müssen

die Vertragsparteien u. a. die Prinzipien der Vorsorge und der nachhaltigen Entwicklung beachten. Die Vertragsparteien sind verpflichtet – auch in Zusammenarbeit untereinander – Technologien und Verfahren zur Minderung von Treibhausgasemissionen zu entwickeln und die nachhaltige Bewirtschaftung sowie die Erhaltung und Verbesserung von Treibhausgassenken und -speichern zu fördern. Das Kyoto- Protokoll[9] verpflichtet darüber hinaus die Industriestaaten zu einer bestimmten Reduktion ihrer Treibhausgasemissionen.

Rechtliche Verpflichtungen zur Vermeidung des Klimawandels beziehen sich nur auf solche Maßnahmen, die entweder den Ausstoß von Kohlendioxid senken oder die einmal in die Atmosphäre gelangte Kohlendioxid in Senken speichern. Daher gilt das internationale Klimaschutzrecht für alle Geo-Engineering-Technologien, die sich auf die Speicherung von Kohlendioxid beziehen. Nicht geklärt ist bislang, ob die Geo-Engineering-Technologien, die durch die Veränderung des Strahlungshaushalts der Erde eine Abkühlung bewirken sollen, vom internationalen Klimaschutzrecht erfasst sind. Denn durch diese wird kein Einfluss auf die Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre genommen (Reynolds 2011).

Falls eine Veränderung des Strahlungshaushalts allerdings negative Auswirkungen auf das (regionale) Klima hat, wie sie etwa bei der großflächigen Installation von Reflektoren in der Wüste befürchtet werden, könnten diese Maßnahmen dem Geist der Klimarahmenkonvention sogar widersprechen, die darauf gerichtet ist, gefährliche anthropogene Störungen des Klimasystems zu verhindern.

Klare Vorgaben für Geo-Engineering-Technologien enthält das internationale Klimaschutzrecht nicht. So ist z. B. die Bedeutung des Vorsorgegrundsatzes[10] streitig. Einerseits wird der Vorsorgegrundsatz als Argument verwendet, dass Maßnahmen, die Risiken für die Umwelt bergen, nicht durchgeführt werden sollen. Andererseits wird im politischen Diskurs auch argumentiert, aus Vorsorgegründen müsse jede Maßnahme, zumindest als ultima ratio („letztes Mittel“), erprobt werden, um dem anthropogenen Klimawandel begegnen zu können. Ferner verlangt das Klimarahmenübereinkommen ausdrücklich die Entwicklung von Gegenmaßnahmen gegen den Klimawandel. Der Vorsorgegrundsatz ist über das internationale Klimaschutzrecht hinaus wohl als allgemeines Prinzip des Umweltvölkerrechts anerkannt[11]. Aus diesem können, wie dargestellt, in Bezug auf Geo-Engineering-Maßnahmen verschiedene Anforderungen abgeleitet werden. In jedem Falle verlangt der Grundsatz aber, dass Staaten Gefahren für Mensch und Umwelt vermeiden, auch wenn kein vollständiger wissenschaftlicher Nachweis über das Vorliegen der Gefahr erbracht werden kann.

4.3 Internationales Recht zum Schutz der biologischen Vielfalt

Geo-Engineering kann zweifelsohne die biologische Vielfalt beeinträchtigen. Beispielsweise können die marinen Methoden in die Nahrungsnetze der Ozeane eingreifen. Auch die land- und forstwirtschaftlichen Methoden bergen Risiken für die Biodiversität.

Die Vertragsstaaten des global geltenden Übereinkommens über die biologischen Vielfalt (Convention on biological diversity, CBD[12]) haben sich daher bereits 2008 mit der Meeresdüngung beschäftigt und im Oktober 2010 einen politisch bedeutsamen Beschluss zum Geo-Engineering verabschiedet. Dieser Beschluss sieht ein weitgehendes Moratorium für Geo-Engineering vor. Angesichts des fehlenden wissenschaftsbasierten, globalen, transparenten und effektiven Kontroll- und Regelungsmechanismus für Geo-Engineering sowie gemäß dem Vorsorgeansatz sollen keine Geo-Engineering-Aktivitäten durchgeführt werden, bis es eine geeignete wissenschaftliche Grundlage für die Rechtfertigung von Geo-Engineering gibt und die mit Geo-Engineering verbundenen Risiken für die Umwelt, die Biodiversität sowie die sozialen, wirtschaftlichen und kulturellen Folgen angemessen berücksichtigt und geprüft werden können. Ausgenommen von diesem Moratorium sind lediglich kleinskalige wissenschaftliche Forschungsstudien, die in einem kontrollierten Rahmen durchgeführt werden. Ferner müssen die Forschungsvorhaben der Gewinnung spezifischer, wissenschaftlicher Daten dienen, die möglichen Umweltwirkungen müssen im Vorfeld vollständig geprüft werden.

Erstmals wurden mit diesem Beschluss unter der Ägide eines global geltenden Übereinkommens allgemeine Anforderungen an Geo-Engineering-Aktivitäten und vor allem an die Forschung formuliert. An den inhaltlichen Vorgaben des Beschlusses (Moratorium für Geo-Engineering-Aktivitäten sowie Kontrolle von entsprechenden Forschungsaktivitäten insbesondere zur Vermeidung negativer Umweltauswirkungen) wird sich ein mögliches, zukünftiges verbindliches Rechtsregime ausrichten.

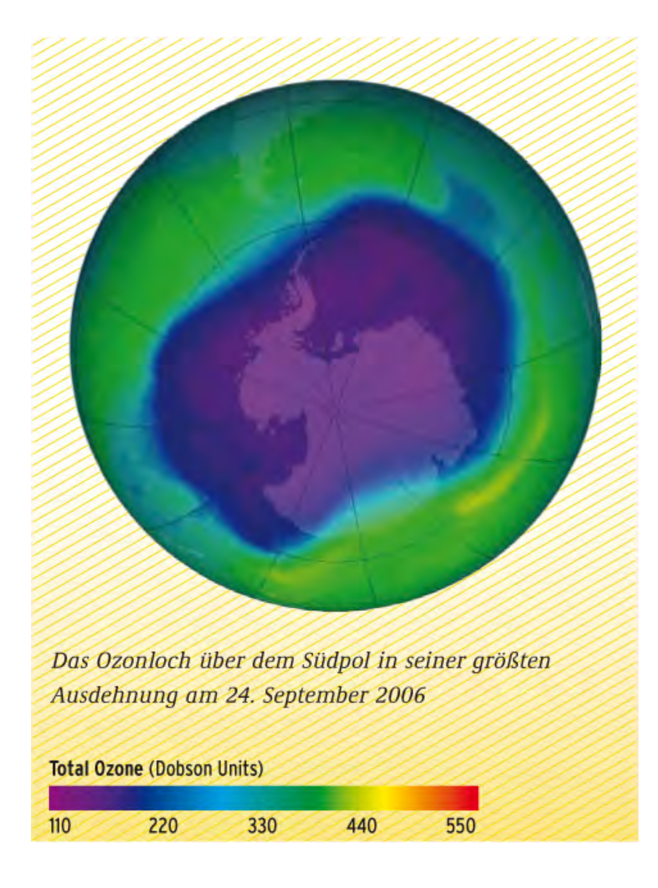
4.4 Terrestrisches Geo-Engineering

Für die rechtliche Bewertung von Geo-Engineering-Maßnahmen ist es unter anderem entscheidend, wo sie durchgeführt werden. Einige Geo-Engineering-Technologien, z. B. der Anbau nachwachsender Rohstoffe, CCS-Maßnahmen und die Steigerung der Albedo von Oberflächen, werden im Wesentlichen auf dem Gebiet eines oder mehrerer Staaten durchgeführt. Andere Maßnahmen, z. B. die Ozeandüngung, finden zum Teil außerhalb der Hoheitsgebiete der Staaten, also auf der Hohen See, statt, die Verbringung von Aerosolen in die Atmosphäre nimmt notwendigerweise die Hoheitsgebiete anderer Staaten in Anspruch und die Installation

von Spiegeln im All betrifft den Weltraum mit Wirkung auf mehrere, wenn nicht sämtliche Staaten.

Soweit eine Maßnahme nur auf dem Hoheitsgebiet eines Staates durchgeführt wird, ist hierfür zunächst der jeweilige Staat verantwortlich und entscheidungsbefugt. Das gilt grundsätzlich für alle terrestrischen Geo-Engineering-Technologien.

Diese Freiheit ist allerdings nicht grenzenlos. Staaten haben aufgrund des allgemeinen Völkergewohnheitsrechts nämlich sicherzustellen, dass Aktivitäten auf ihrem Staatsgebiet keine erheblichen schädlichen Folgen für die Umwelt jenseits ihrer Staatsgrenzen verursachen. Erhebliche Umweltbeeinträchtigungen dürfen weder in Nachbarstaaten noch sonstigen Staaten und staatsfreien Räumen, wie z. B. der Hohen See, dem Tiefseeboden, der Antarktis und dem Weltraum, hervorgerufen werden. Außerdem sind die Staaten zu verfahrensrechtlichen Maßnahmen verpflichtet. So sind, wenn das Risiko erheblicher grenzüberschreitender Auswirkungen eines Vorhabens besteht, im Vorfeld Umweltverträglichkeitsprüfungen durchzuführen (IGH, Pulp Mills Fall, Urteil vom 20. April 2010, § 204), die potentiell betroffenen Staaten rechtzeitig und substanziell zu informieren und diese zu den Vorhaben anzuhören (Birnie et al. 2009).[13] Das allgemeine Völkergewohnheitsrecht verlangt also, erhebliche nachteilige Umweltauswirkungen außerhalb des eigenen Hoheitsgebiets zu vermeiden und verpflichtet die Staaten, im Vorfeld Risiken zu prüfen und betroffene Staaten zu informieren und zu konsultieren.



Das Ozonloch über dem Südpol in seiner größten Ausdehnung am 24. September 2006

4.5 Atmosphärisches Geo-Engineering

Eine andere Überlegung ist, durch das Einbringen von Schwefelaerosolen in die Stratosphäre das Sonnenlicht zu streuen, um so eine Abkühlung in Bodennähe zu bewirken. Bei dieser Maßnahme muss notwendigerweise ein Großteil der globalen Stratosphäre in Anspruch genommen werden. Die staatliche Hoheitsgewalt erstreckt sich auf die Luftsäule über dem Staatsgebiet bis zum Weltraum. Über die genaue Lage der Grenze zwischen Luft- und Weltraum besteht Uneinigkeit; jedenfalls bis unterhalb von 80 km über der Erdoberfläche liegt nach allgemeiner Ansicht der Luftraum (Graf Vitzthum 2010a).

Innerhalb ihres Luftraums sind aufgrund ihrer Gebietshoheit die einzelnen Staaten zuständig. Wenn ein einzelner Staat im Hoheitsgebiet eines anderen Staates tätig werden will, bedarf er hierfür der Zustimmung dieses Staates. Es ist daher zweifelhaft ob unilaterale atmosphärische Geo-Engineering-Maßnahmen, die im globalen Luftraum stattfinden sollen, ohne die Zustimmung der betroffenen Staaten zulässig wären.

Die Ausbringung von Schwefelaerosolen könnte überdies gegen das internationale Rechtsregime zum Schutz der Ozonschicht verstoßen, da dadurch die Ozonschicht geschädigt und zerstört werden kann. Zwar zählt Schwefel nicht zu den nach dem Montrealer Protokoll[14] reglementierten Stoffen. Allerdings verpflichtet das Wiener Übereinkommen zum Schutz der Ozonschicht von 1985[15] die Vertragsstaaten, Aktivitäten in ihrem Hoheitsbereich zu verhindern, die infolge der Veränderung der Ozonschicht die Gesundheit und Umwelt (wahrscheinlich) schädigen.

Die Ausbringung von Schwefelaerosolen würde daher den Vorgaben des Wiener Übereinkommens widersprechen, wenn anzunehmen ist, dass dadurch z. B. wegen der ausgebrachten Mengen die Ozonschicht geschädigt wird und dadurch Gesundheitsbeeinträchtigungen verursacht werden.

Von Bedeutung ist des Weiteren das Übereinkommen über weiträumige, grenzüberschreitende Luftverunreinigungen von 1979, dessen Mitgliederkreis allerdings – abgesehen von den USA und Kanada – auf die Staaten Europas beschränkt ist.[16] In den hierzu vereinbarten Protokollen haben sich dessen Vertragsstaaten verpflichtet, die Schwefelemissionen zu verringern. Die gezielte Ausbringung von Schwefelaerosolen widerspricht dem Sinn dieser Verpflichtungen (Bodansky 1996).

Im Übrigen gilt – wie oben dargestellt – das allgemeine völkerrechtliche Verbot erheblicher grenzüberschreitender Umweltbeeinträchtigungen. Die Ausbringung von Schwefelaerosolen kann neben dem bereits erwähnten Abbau der Ozonschicht erhebliche Rückgänge der Nie-

derschlagsmengen des asiatischen und afrikanischen Sommermonsuns zur Folge haben; dies könnte die Nahrungsmittelversorgung von Millionen von Menschen beeinträchtigen.

4.6 Marines Geo-Engineering

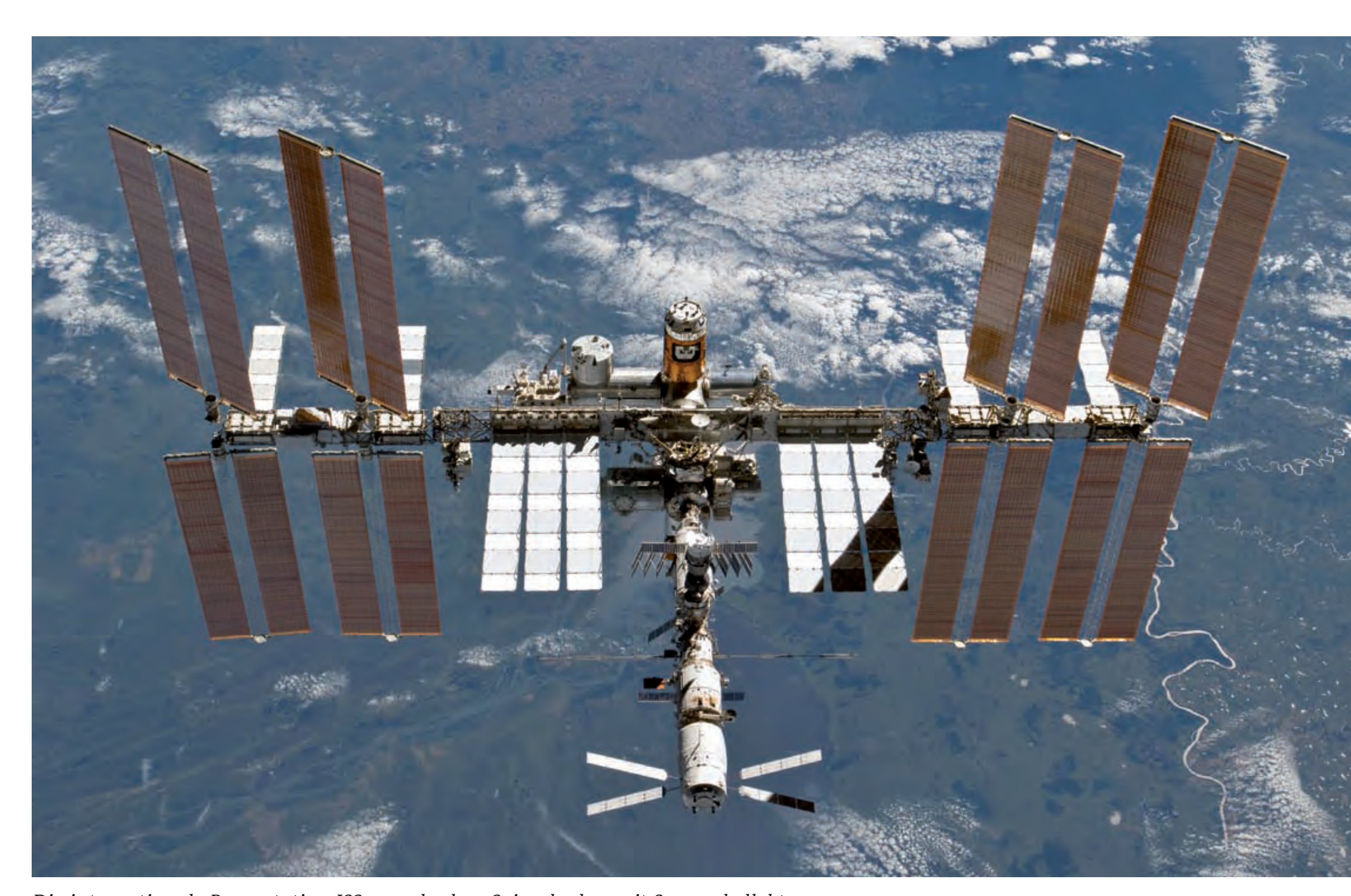
Eine weitere Maßnahme zur Beeinflussung des globalen Klimas ist die so genannte Ozeandüngung. Einschlägig ist dafür vor allem die Seerechtskonvention und die darauf basierende Londoner Konvention über die Verhütung der Meeresverschmutzung durch das Einbringen von Abfällen und anderer Stoffe sowie das entsprechende Londoner Protokoll.

Da die Vorschriften dieser Übereinkommen nicht eindeutig sind, haben die Vertragsstaaten im Oktober 2008 den politisch sehr bedeutsamen Beschluss gefasst, dass Forschungsmaßnahmen im Bereich der Ozeandüngung weiterhin erlaubt sein sollen, alle anderen Maßnahmen, insbesondere solche kommerzieller Natur, hingegen verboten sind. Forschungsaktivitäten sind im Vorfeld daraufhin zu überprüfen, ob die Experimente erforderlich sind und ob von ihnen unvertretbare Umweltauswirkungen ausgehen. Im Oktober 2010 haben die Vertragsstaaten ein Bewertungskonzept („Assessment Framework“) für die Prüfung von Forschungsvorhaben verabschiedet. Geprüft werden muss neben der wissenschaftlichen Qualität, ob nachteilige Umweltauswirkungen zu erwarten sind. Wirtschaftliche Interessen dürfen nach dem „Assessment Framework“ die Ausrichtung des Forschungsvorhabens nicht beeinflussen. Im Vorfeld sind andere Staaten und Interessierte zu konsultieren. Die Bedeutung des „Assessment Framework“ besteht darin, dass für Forschungsvorhaben im Bereich des Geo-Engineerings erstmalig Bewertungsstandards international vereinbart werden. Die Bewertungskriterien und -standards sind anspruchsvoll, aber auch angemessen.

Daneben verhandeln die Vertragsstaaten derzeit darüber, wie der Beschluss von 2008 in eine rechtlich verbindliche Fassung überführt werden kann. Die Vertragsstaaten der Konvention über die biologische Vielfalt haben 2008 einen inhaltlich weitgehend identischen Beschluss wie den Beschluss von LC/LP (London Übereinkommen und London Protokoll) im Jahr 2008 gefasst. Der Beschluss wurde von der Vertragsstaatenkonferenz der CBD 2010 bestätigt.

4.7 Geo-Engineering im Weltraum

Schließlich existiert der Vorschlag, Spiegel und andere Gegenstände im Weltall zu installieren. Im Unterschied zum Territorium und der darüber liegenden Luftsäu-



Die internationale Raumstation ISS – noch ohne Spiegel, aber mit Sonnenkollektoren für eine autarke Energieversorgung im All

le ist der Weltraum – wie die Hohe See – staatsfreies Gebiet. Die Rechtsverhältnisse im Weltraum regelt der Weltraumvertrag von 1967[17] und einige ergänzende völkerrechtliche Verträge. Der Weltraumvertrag stellt zunächst klar, dass die Erforschung und Nutzung des Weltraums zum Vorteil und im Interesse aller Staaten durchgeführt wird. Alle Staaten dürfen den Weltraum im Einklang mit dem Völkerrecht gleichberechtigt friedlich nutzen und erforschen (Weltraumfreiheit) und sollen hierbei zusammenarbeiten. Ausdrücklich verbietet der Weltraumvertrag nur solche schädlichen Umweltwirkungen, die aus der Einbringung außerirdischer Stoffe resultieren. Fraglich ist aber, ob die Weltraumfreiheit auch Weltraumaktivitäten umfasst, die auf der Erde auf andere Weise schädliche Umweltwirkungen verursachen, beispielsweise durch Veränderungen im Wasserkreislauf, da sie nicht zum Vorteil und im Interesse aller Staaten wären (Konstantinov 1990). Jedenfalls stünde das Verbot erheblicher grenzüberschreitender Umweltbelastungen auch Geo-Engineering im Weltraum entgegen, soweit hierdurch erhebliche Umweltschädigungen verursacht werden.

4.8 Staatenhaftungsrecht

Geo-Engineering-Maßnahmen können, selbst wenn sie das globale Klima positiv beeinflussen sollten, gleichwohl erheblich negative Folgen für die klimatischen Bedingungen einzelner Regionen haben. Befürchtet wird etwa, dass es durch die Verringerung von Niederschlägen in Indien oder Afrika zu erheblichen Ernteausfällen kommen könnte.

Kann nun ein Staat in einem solchen Falle von einem anderen Staat, wenn dieser atmosphärische Geo-Engineering-Maßnahmen durchgeführt hat, Schadensersatz verlangen? Allgemeine vertragliche Bestimmungen des internationalen Rechts in Bezug auf die Haftung zwischen Staaten fehlen. Regelungen der Staatenhaftung sind aber gewohnheitsrechtlich anerkannt. 2001 hat die UN-Völkerrechtskommission hat einen Entwurf zum Staatenhaftungsrecht fertig gestellt, welcher jedoch nur als Anlage in eine rechtlich unverbindliche Resolution der UN-Generalversammlung aufgenommen wurde. Die darin enthaltenen Regeln stellen daher nur insoweit bindendes Völkerrecht dar, als sie das Gewohnheitsrecht kodifizieren (Graf Vitzthum 2010b).

Die Staatenhaftung setzt einen Verstoß gegen eine völkerrechtliche Pflicht voraus. Allerdings ist es – wie oben gesehen – nicht immer einfach festzustellen, welche konkreten völkerrechtlichen Pflichten bei der Durchführung von Geo-Engineering-Maßnahmen in Bezug auf die Rechte anderer Staaten bestehen. Hinzu kommt die Schwierigkeit, einen Nachweis der Ursachenzusammenhänge zu führen (Shaw 2009).

4.9 Folgerungen für den zukünftigen Rechtsrahmen

Wie dargestellt, sind die bestehenden internationalen Regelungen lückenhaft. Klare Regelungskonzepte, wie mit Geo-Engineering-Maßnahmen in der Zukunft umgegangen werden soll, fehlen bislang. Am weitesten gediehen sind die seerechtlichen Vorgaben zur Ozeandüngung.

In Bezug auf den zukünftigen Rechtsrahmen ist erstens festzustellen, dass es sich bei den meisten Geo-Engineering-Methoden noch um bloße theoretische Überlegungen handelt, deren Tauglichkeit noch erprobt werden muss. Dem muss sich auch das Recht stellen. Insoweit kann das Regelungskonzept zur Ozeandüngung als Orientierung gelten: Forschung ist zwar grundsätzlich erlaubt, allerdings muss auch bei Forschungsaktivitäten sichergestellt sein, dass keine Gefahren für Mensch und Umwelt verursacht werden. Für die Notwendigkeit einer vorherigen staatlichen Kontrolle von Geo-Engineering-Forschungsmaßnahmen spricht, dass diese mit erheblichen Risiken und unumkehrbaren Folgen verbunden sein können (vgl. auch Reynolds 2009)

Es ist zu klären, ob es eine einheitliche, umfassende Regelung zu allen Geo-Engineering- Maßnahmen geben sollte oder ob die jeweiligen spezifischen internationalen Verträge um Vorschriften für (einzelne) Geo-Engineering-Maßnahmen ergänzt werden sollten. Für eine einheitliche, übergreifende Regelung käme die Klimarahmenkonvention in Betracht. Die Frage ist derzeit kaum zu beantworten.

FUSSNOTEN:

8 BGBl II 1993, S. 1784. Dem Übereinkommen gehören 192 Vertragsparteien (191 Staaten und die Europäische Union [EU]) an, http://unfccc.int/parties_and_observers/parties/items/2352.php (Abfrage 02.02.2010).

9 BGBl II 2002, S. 967. Das Kyoto-Protokol gilt für 189 Staaten und die EU, http://unfccc.int/files/kyoto_protocol/status_of_ratification/application/pdf/kp_ratification_20091203.pdf (Abfrage 12.02.2010).

10 Dieser ist in Art. 3 Abs. 3 Klimarahmenkonvention verankert.

11 Das Vorsorgeprinzip wird teilweise als allgemeiner Rechtsgrundsatz des Völkerrechts eingeordnet, vgl. Maurmann 2008. Vielfach wird dem Vorsorgeprinzip gewohnheitsrechtliche Geltung zugesprochen, siehe dazu Sands 2003 und Birnie et. al 2009. Der IGH hat das Vorsorgeprinzip als mögliche Interpretationshilfe für vertragliche Regelungen bezeichnet (IGH, Pulp Mills Fall, Urteil vom 20. April 2010, § 164).

12 BGBl II 1993, 1741. Die CBD gilt für 193 Staaten allerdings nicht für die USA, http://www.cbd.int/convention/parties/list/ (Abfrage: 15. November 2010).

13 Vgl. auch die rechtlich unverbindlichen Draft articles on Prevention of Transboundary Harm from Hazardous Activities der UN-Völkerrechtskommission von 2001.

14 Das Montrealer Protokoll über Stoffe, die zu einem Abbau der Ozonschicht führen, führt stufenweise Stabilisierungs- und Reduktionsverpflichtungen sowie Handelsbeschränkungen für bestimmte Stoffe ein. Dem Protokoll in der Fassung seiner letzten Ergänzung, abgedruckt in BGBl II 2003, S. 346, gehören 160 Staaten sowie die EU an, http://www.unep.ch/ozone/Ratification_status/index.shtml (Abfrage 12.02.2010).

15 BGBl II 1988, S. 902. Dem Übereinkommen gehören 196 Vertragsparteien (195 Staaten und die EU) an http://www.unep.ch/ozone/Ratification_status/index.shtml (Abfrage 02.02.2010).

16 BGBl II 1982, S. 374. Dem Übereinkommen gehören 51 Vertragsparteien (50 Staaten und die EU) an http://www.unece.org/env/lrtap/status/lrtap_st.htm (Abfrage 12.02.2010).

17 BGBl II 1969, S. 1969. Dem Vertrag gehören 100 Vertragsparteien an, http://www.oosa.unvienna.org/oosatdb/showTreatySignatures.do (Abfrage 12.02.2010).

05

KRITERIEN ZUR BEWERTUNG VON GEO-ENGINEERING-MASSNAHMEN

Geo-Engineering führt in den meisten Fällen zu großräumigen technischen Eingriffen in die Umwelt mit Auswirkungen sowohl auf das Klima als auch auf sonstige Umweltgüter oder den Menschen. Wirksamkeit und Folgen von Geo-Engineering-Maßnahmen sind mit dem heute verfügbaren Wissen kaum zu prognostizieren. In diesem Hintergrundpapier versuchen wir folgenden grundlegenden Fragen nachzugehen:

- **Mit welchen Kriterien lassen sich Geo-Engineering-Maßnahmen sinnvoll bewerten?**
- **Unter welchen Umständen lohnen sich hohe Investitionen in Geo-Engineering-Maßnahmen?**

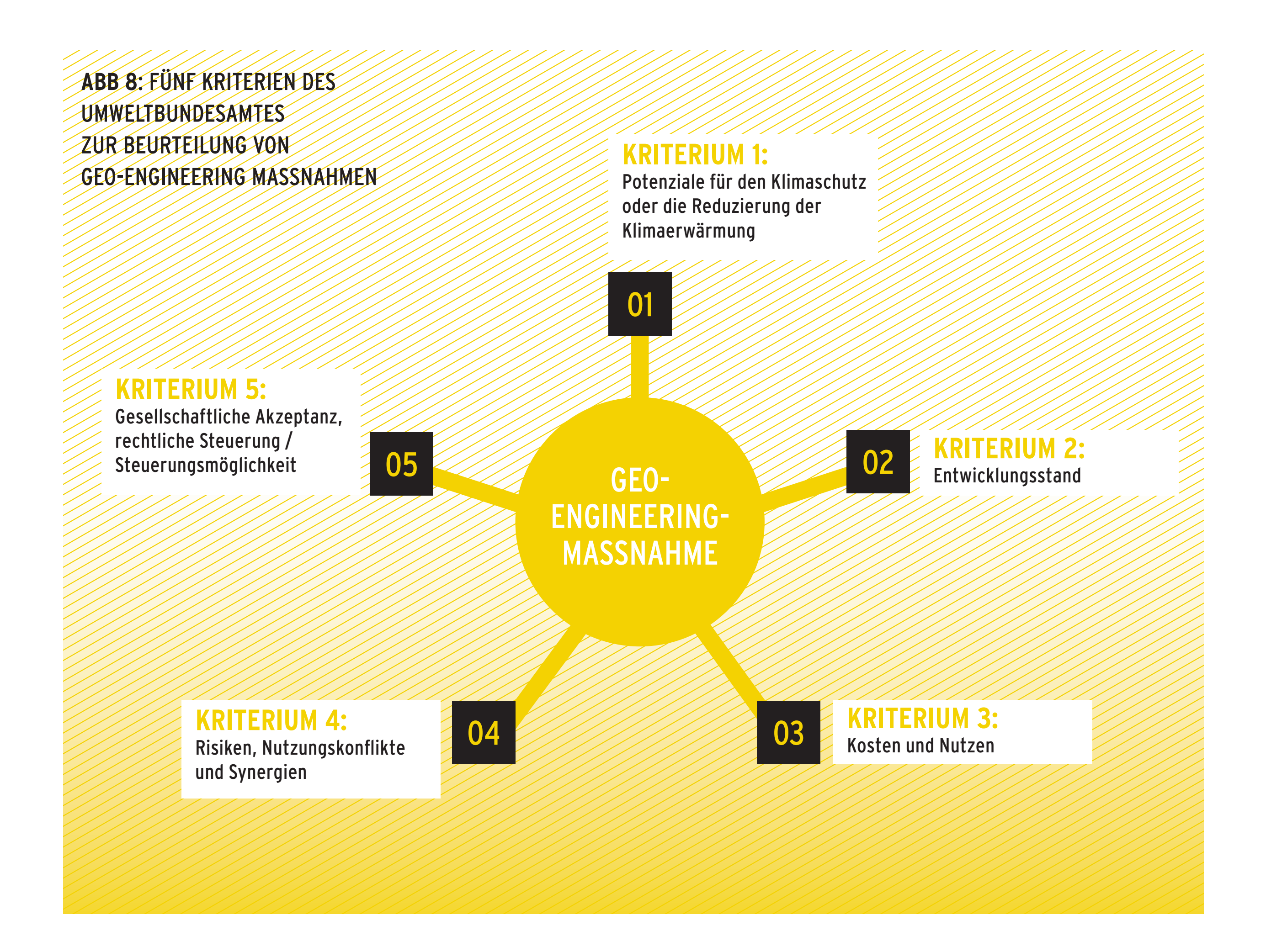
Die nachfolgend vorgestellten Kriterien sollen politische Entscheidungsträger bei der Bewertung von Geo-Engineering-Maßnahmen unterstützen, sowohl für die Erforschung und Erprobung als auch in Bezug auf die Anwendung solcher Maßnahmen.

Es ist offensichtlich, dass zur Beantwortung sehr komplexer Fragen eine einfache Investitionsrechnung oder Kosten-Nutzen-Analyse zu kurz greift: Nicht alle Folgen lassen sich gegenwärtig auch ökonomisch bewerten. Ferner bestehen große Unsicherheiten bei der Bewertung möglicher Folgen und Risiken für Mensch und Umwelt. Zudem handelt es sich zum Teil um globale Wirkungen und Folgen, die erst in ferner Zukunft auftreten. Die Bewertung hängt daher sehr stark davon ab, wie künftige Kosten im Vergleich zu den heutigen Kosten gewichtet werden. Dies drückt sich in der zugrunde gelegten Diskontrate (Zinsrate)[18] aus. Eine Diskontrate von Null bedeutet eine Gleichgewichtung der Schäden heute und in Zukunft und damit auch eine Gleichbehandlung der Interessen heutiger und künftiger Generationen im Sinne der Nachhaltigkeit. Je höher die Diskontrate umso weniger fallen die erst in Zukunft auftretenden Schadenskosten bei der heutigen Kostenrechnung ins Gewicht.

Die Gegenüberstellung bekannter und erfassbarer Kosten und Nutzen kann vor dem Hintergrund dieser Einschränkungen aus unserer Sicht nur ein Kriterium für die Beurteilung von Geo-Engineering Maßnahmen sein. Darüber hinaus sind deshalb auch weitere Kriterien zu berücksichtigen.

Maßnahmen des Geo-Engineering haben zum Ziel, den anthropogenen Klimawandel einzudämmen. Sie konkurrieren daher in gewisser Weise mit Maßnahmen zur Emissionsminderung und zur Anpassung an Klimaänderungen. Auch wenn es hier nicht um eine streng alternative „entweder Emissionsminderung oder Geo-Engineering“ Entscheidung geht, ist zu berücksichtigen, dass die für den Klimaschutz zur Verfügung stehenden Mittel begrenzt sind und „ein Mehr“ an Geo-Engineering-Maßnahmen „ein Weniger“ an Emissionsminderungsmaßnahmen nach sich zieht.

Wichtige Entscheidungskriterien dafür, ob und in welchem Maße Geo-Engineering zu fordern und finanziell zu fördern ist, sind aus Sicht des Umweltbundesamtes die Potenziale für den Klimaschutz und die Reduzierung der Klimaerwärmung, der Entwicklungsstand der Technologie, wirtschaftliche Kosten und Nutzen, Risiken und Synergien sowie die gesellschaftliche Akzeptanz und der rechtliche Rahmen. Die Kriterien lassen sich wegen gegenseitiger Abhängigkeiten aber nicht so trennscharf anwenden, wie dies im folgenden Text dargestellt wird.



Kriterium 1: Potenziale für den Klimaschutz oder die Reduzierung der Klimaerwärmung

Bei der Ausfüllung dieses Kriteriums sollte in einem ersten Schritt dargestellt werden, welche Wirkung die zu beurteilende Maßnahme bei welchem Aufwand erwarten lässt. Geo-Engineering-Maßnahmen sollten nur dann erwogen werden, wenn man mit einem maßgeblichen Nutzen für den Klimaschutz rechnen kann.

Entscheidende Fragen sind:

- Ist die Geo-Engineering-Technik in der Lage, effektiv den Klimawandel zu beeinflussen oder die Klimaerwärmung zu reduzieren? Falls ja, in welchem Ausmaß?
- Ist sie großflächig einsetzbar, falls sie nur bei großflächigem Einsatz hinreichenden Erfolg verspricht? Welchen Emissionsminderungen würde dies entsprechen? Welcher Aufwand würde damit einhergehen?

Positiv zu bewerten sind hohe Potenziale gekoppelt mit geringem Aufwand oder geringer Eingriffstiefe.

Kriterium 2: Entwicklungsstand

Bei der Beurteilung der Maßnahme ist es auch entscheidend, ob sie unmittelbar einsetzbar wäre oder ob Realisierung und Wirksamkeit noch unsicher sind und es noch weiterer Forschung bedarf.

Entscheidende Fragen sind:

- Wie ist der Forschungs- und Entwicklungsstand dieser Geo-Engineering-Technik? Gibt es bereits Pilotprojekte?
- In welchen Ländern liegen Erfahrungen vor?
- Mit welcher Sicherheit lassen sich die Wirkungen und die unerwünschten Effekte grundsätzlich und in Bezug auf Einzelmaßnahmen vorhersagen?

Positiv zu bewerten sind ein hoher Entwicklungsstand, bereits vorliegende Erfahrungen z. B. über Pilotprojekte und eine zeitnahe Einsatzmöglichkeit.

Kriterium 3: Kosten und Nutzen

Bei diesem Kriterium geht es darum, die ökonomisch bewertbaren Kosten und Nutzen auszuweisen. Bei der Gesamtbewertung muss darauf geachtet werden, dass die hier dargestellten Kosten nur einen Teil der relevanten positiven und negativen Folgen abbilden. In die Schätzungen sollten die Kosten und Nutzen des gesamten Lebenszyklus einbezogen werden. Sofern die Kosten und Nutzen in unterschiedlichen Zeiträumen anfallen, sollte der Einfluss der Diskontierung auf das Ergebnis dargestellt werden z. B. über Durchführung von Sensitivitätsanalysen.

Mögliche Kosten- und Nutzenkategorien sind:

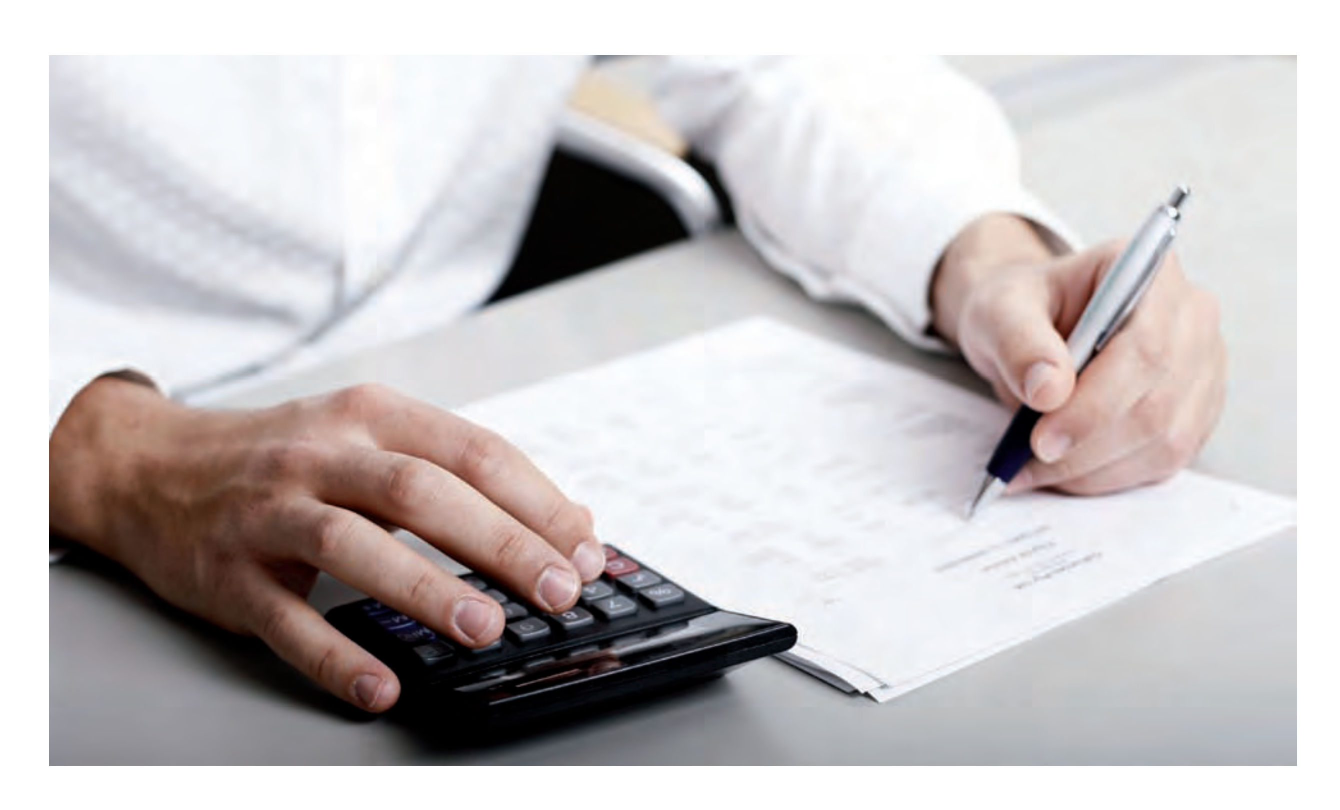
- Forschungs- und Entwicklungskosten, Kosten von Pilotanwendungen;
- Investitionskosten, Kosten des Betriebs;
- vor- und nachgelagerte Kosten (z. B. Entsorgungskosten), Folgekosten (z. B. Ersatzkosten in Abhängigkeit von der Lebensdauer);
- Kosten durch Umwelt- oder Gesundheitsschäden (sofern monetarisierbar);
- Knappheitskosten des Ressourcenverzehrs;
- volkswirtschaftliche Folgekosten sofern prognostizierbar (z. B. wegen dauerhafter Finanzierung der Maßnahme durch den Staat);
- gesamtwirtschaftliche Wirkungen (z. B. auf Bruttoinlandsprodukt, Beschäftigung)
- Nutzen für den Klimaschutz / die Klimafolgen (über geeignete nicht-qualitative oder quantitative Indikatoren darzustellen);
- sonstiger Nutzen (z. B. für Wirtschaft, Beschäftigung, andere Umweltbereiche).

Die Aufstellung der Kosten und Nutzen sollte (unter diesem oder anderen Kriterien) ergänzt werden um solche Effekte, die sich nur qualitativ erfassen lassen. Dies verhindert, dass eine Überbetonung der monetär erfassbaren Wirkungen bei der Entscheidungsfindung erfolgt.

Bei der Bilanzierung von Kosten und Nutzen ist zu beachten, dass sich diese auf eine definierte Maßnahme je Einheit beziehen. Generell sind Maßnahmen umso positiver zu beurteilen, je höher das Nutzen-Kosten-Verhältnis ist. Relevant für die Beurteilung ist auch, ob dauerhaft Kosten anfallen. Während zum Beispiel bei Energieeffizienzmaßnahmen am Anfang der Maßnahme Kosten anfallen, die Erträge dieser Maßnahme aber dauerhaft durch geringere Emissionen wirken, können Geo-Engineering-Maßnahmen dadurch gekennzeichnet sein, dass der positive Einfluss auf das Klima nur mit dauerhaften Eingriffen zu erreichen ist.

Geo-Engineering-Maßnahmen stellen Eingriffe in die Natur dar, deren Risiken nicht umfassend in Geldeinheiten bewertbar sind. Man kann daher davon ausgehen, dass die tatsächlichen Kosten der Geo-Engineering-Maßnahmen höher sind als die ökonomisch kalkulierbaren Kosten. Die Kosten stellen daher nur eine Untergrenze dar.

Auf der anderen Seite haben Emissionsminderungsmaßnahmen einen Zusatznutzen, da sie oftmals nicht nur dem Klimaschutz, sondern auch zur Ressourcenschonung dienen. Geo-Engineering-Maßnahmen, die von vornherein auch ökonomisch schlechter als Emissionsminderungsmaßnahmen abschneiden, sind negativ zu bewerten.



Kriterium 4: Risiken, Nutzungskonflikte und Synergien

Ein entscheidendes Kriterium für die Beurteilung von Geo-Engineering-Maßnahmen ist das damit verbundene Risiko, das auch unmittelbar mit dem Grad des Eingriffs in den Naturhaushalt zusammenhängt. Relevant ist vor allem die Frage, inwiefern es sich um einen Eingriff handelt, der nicht mehr rückgängig gemacht werden kann. Hilfreich für die Beurteilung ist die Nutzung der vom WBGU[19] entwickelten Risikotypen für globale Umweltgefahren (WBGU 1999).

Leitfragen zur Beurteilung der Risiken, Nutzungskonflikte und Synergien sind aus Sicht des UBA:

Risiken:

- Wirkung auf Ökosysteme
  Welche Auswirkungen (qualitativ und quantitativ) haben die mit den Geo-Engineering-Maßnahmen verbundenen Eingriffe in Natur und Umwelt? Sind die Ziele einschlägiger Gesetze gefährdet? Welches Ausmaß haben die Eingriffe in Raum und Zeit? Wie grundlegend ist die Naturveränderung? Werden besonders geschützte oder sensible Gebiete und/oder Tier- und Pflanzenarten gefährdet oder in Anspruch genommen?
- Ausmaß der Belastung
  Wie groß ist das räumliche Ausmaß der unerwünschten Effekte (groß-, mittel-, kleinräumig – Beispiel: CO_2-Speicherung nur lokal, Schwefelaerosole notwendigerweise weltweit)? Können Regionen der Welt unterschiedlich stark von negativen Effekten betroffen sein – z. B. Auswirkungen des Albedo-Effekts in Afrika, Auswirkungen der Ozeandüngungen auf bestimmte Regionen der Welt?
- Risikomanagement
  Welche Risiken entstehen für Mensch und Umwelt? Ist ein effektives Risikomanagement für die Entwicklung und Erprobung der Geo-Engineering-Technik verfügbar? Kann nach Einsatz der Geo-Engineering-Technik die Induzierung möglicher negativer Effekte gestoppt werden? Sind die unerwünschten Effekte mittelfristig reversibel?

Nutzungskonflikte und Synergien:

- Welche Nutzungskonflikte können auftreten (CO_2-Speicherung versus Geothermie, Nachwachsende Rohstoffe- oder Lebensmittel-Produktion, hoher Bedarf an Ressourcen)?
- Welche Synergien können auftreten? Gibt es vergleichbare win-win-Potenziale wie bei den Strategien Energiesparen, Energieeffizienz erhöhen, Ausbau erneuerbarer Energien (Kosteneinsparungen, Technologieförderung, Abhängigkeit von Importen reduzieren, inländische Wertschöpfung/Beschäftigung erhöhen, Wettbewerbsfähigkeit stärken)?

Kriterium 5: Gesellschaftliche Akzeptanz, rechtliche Steuerung / Steuerungsmöglichkeit

Gesellschaftliche Akzeptanz und rechtliche Machbarkeit entwickeln sich in einem gesellschaftlichen Diskurs und sind abhängig von dem gesellschaftspolitischen Umfeld. Generell dürfte z. B. in Deutschland eine größere Skepsis gegenüber Geo-Engineering-Maßnahmen bestehen als etwa in den USA.

Geo-Engineering-Maßnahmen beinhalten Aspekte, die sich einer objektiv-wissenschaftlichen Bewertung entziehen, aber für die gesellschaftliche Akzeptanz von erheblicher Bedeutung sind. Die Frage, wie einzelne Gesellschaften mit Unsicherheiten sowohl hinsichtlich der Chancen als auch der Risiken umgehen, ist in diesem Kontext daher ein wichtiges Kriterium.

Aus unserer Sicht wichtige Leitfragen sind:

- Gibt es einen gesellschaftlichen Diskurs zum Einsatz dieser Geo-Engineering-Technologie, und falls ja, mit welcher Einschätzung? Sind die Entwicklung und/oder der Einsatz der Geo-Engineering-Technik gesellschaftlich akzeptiert und politisch vermittelbar?
- Welche ethischen und ggf. moralischen, religiösen oder ästhetischen Grundsätze werden durch den Einsatz dieser Technologie berührt?
- Wie soll mit den bestehenden Unsicherheiten sowohl hinsichtlich der Chancen als auch der Risiken umgegangen werden?
- Inwieweit findet eine Abwälzung der Risiken auf die nachfolgende Generation statt?
- Ist ein geeignetes (internationales) Rechtsregime verfügbar, um die Entscheidungen in Bezug auf die Entwicklung und den Einsatz der Geo-Engineering-Technik zu steuern – z. B. die Verhinderung von unilateralen Entscheidungen? Können in dem rechtlichen Kontrollregime alle genannten Aspekte in einer Art Gesamtabwägung berücksichtigt werden?

FUSSNOTEN:

18 Mit dem Zinssatz werden Kosten und Nutzen, die in verschiedenen Perioden anfallen, auf einen Zeitpunkt – zumeist den Gegenwartswert – diskontiert. Der Gegenwartswert drückt dann aus, welchen Betrag man heute zu dem jeweiligen Zinssatz anlegen müsste, um die in Zukunft anfallenden Schäden zu bezahlen. Beispielsweise müsste man heute 95,24 Euro zu einem Zinssatz von 5 % anlegen, um in einem Jahr einen Schaden in der Höhe von 100 Euro begleichen zu können.

19 WBGU = Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen.



06

AUSBLICK UND EMPFEHLUNGEN

Die Idee, Geo-Engineering-Maßnahmen zum Schutze des Klimas einzusetzen, ist relativ neu, und sie erfreut sich derzeit einer großen Aufmerksamkeit. Einige Staaten wie die USA erwägen klimaschutzbezogene Geo-Engineering-Maßnahmen schon jetzt ernsthaft.

Der Reiz des Geo-Engineering liegt auf der Hand: Erstens müssen der Gesellschaft keine oder zumindest geringere Verhaltensänderungen zur Reduzierung von CO_2-Emissionen abverlangt werden. Zweitens wird eine technische Lösung der Klimaproblematik versprochen. Drittens sind bei einigen der Geo-Engineering-Maßnahmen keine langwierigen internationalen Verhandlungen erforderlich, vielmehr können Staaten faktisch unilateral, also von sich aus tätig werden. Auftrieb erhielt die Idee des Geo-Engineering vor allem wegen der bislang erfolglosen Bemühungen über ein neues globales Klimaschutzabkommen unter dem Dach der UN-Klimarahmenkonvention. Welche Übereinkunft über die weltweiten Klimaschutzbemühungen die internationale Staatengemeinschaft in Zukunft treffen wird, ist im Vorfeld der kommenden Vertragsstaatenkonferenzen in Südafrika (2011) noch nicht abschließend geklärt. Sicher ist: Wissenschaft, Politik und Gesellschaft werden sich weiter mit dem Thema Geo-Engineering beschäftigen.

Problematisch aus Sicht des Umweltbundesamtes ist vor allem der mögliche Paradigmenwechsel in der Klimapolitik, der mit der Anwendung des Geo-Engineering verbunden sein könnte. Drei Aspekte sind dabei besonders kritisch:

Der erste Aspekt betrifft die Annahme, dass der Mensch in der Lage sei, Umweltprozesse im globalen Maßstab tatsächlich zu steuern und zu gestalten. Menschen haben zwar schon immer die Natur und Umwelt zu ihren Zwecken genutzt und gestaltet, z. B. im Bereich der Land- und Forstwirtschaft. Geo-Engineering-Maßnahmen zielen jedoch auf eine globale Beeinflussung der Umweltprozesse ab; das ist sowohl in der Dimension als auch in der Komplexität eine völlig andere Qualität. Viele Geo-Engineering-Vorschläge gehen davon aus, dass der Mensch die kurz- und langfristigen Folgen der Einflussnahme auf globale Umweltprozesse versteht und sie kontrollieren kann.

Zweitens besteht die Gefahr, dass Geo-Engineering-Maßnahmen als Ersatz für Minderungs- und Anpassungsmaßnahmen angesehen werden. Dies würde also einen grundlegenden Wandel der Ausrichtung der Klimaschutzpolitik weg von der Minderung von Treibhausgasen und der Anpassung an den Klimawandel hin zu Geo-Engineering bedeuten. Wir sehen dies mit Sorge, weil die Förderung von Geo-Engineering die im Grundsatz nachhaltige und vorsorgende Klimapolitik der Vermeidung und Anpassung schwächen würde.

Der dritte kritische Aspekt besteht darin, dass Grundprinzipien der internationalen Umweltpolitik und diverser internationaler Umweltschutzübereinkommen (Quellenansatz, Reduzierung von Schadstoffeinträgen und gleichrangiger Schutz der Medien Luft, Wasser und Boden) nicht mehr gelten sollen. Einige der Geo-Engineering-Vorschläge drohen, die im Umweltschutz der letzten Jahrzehnte mühsam erreichten Erfolge bei der Reduzierung von Stoffeinträgen in Wasser, Luft und Boden zunichte zu machen und stehen damit in Konflikt zur bisherigen Umweltpolitik. Zum Beispiel sollen nunmehr beim marinen Geo-Engineering gezielt Substanzen in die marine Umwelt eingebracht werden, während bislang die Minimierung des Stoffeintrags erklärtes Ziel der internationalen Bemühungen war.

Die meisten Geo-Engineering-Maßnahmen „stecken noch in den Kinderschuhen". Es handelt sich um Vorschläge, die sich noch im Stadium theoretischer Überlegungen befinden. In der Regel können daher weder eindeutige Aussagen über die Wirksamkeit und den Zeitpunkt der Einsetzbarkeit gemacht werden, noch können die Risiken und Nebenwirkungen vernünftig abgeschätzt werden. Selbst bei den besser untersuchten Konzepten, wie z. B. der Ozeandüngung, sind die theoretisch zugrunde gelegten Wirkmechanismen noch unzureichend verstanden und es ist mit erheblichen Risiken und Nebenwirkungen zu rechnen, deren Folgen weder beherrschbar noch reversibel sind.

Es besteht noch erheblicher Klärungsbedarf hinsichtlich der Kriterien, die politische Entscheidungsträger bei der Prüfung von Geo-Engineering-Maßnahmen anwenden sollten. Das UBA hat hierzu einen Kriterien-Katalog vorgelegt, der Mindestanforderungen enthält (siehe Kapitel 5).

Festzustellen ist schließlich, dass sich die verschiedenen Geo-Engineering-Maßnahmen mit Blick auf ihre Risikodimensionen, ihre Beherrschbarkeit und Reversibilität erheblich unterscheiden. Während bei allen Geo-Engineering-Maßnahmen Wirkungen auf das globale Klima intendiert sind, unterscheiden sie sich vor allem im Hinblick auf die räumliche Reichweite der sonstigen Auswirkungen auf Mensch und Umwelt. Maßnahmen, die in ihren sonstigen Wirkungen auf Mensch und Umwelt im Wesentlichen räumlich begrenzt sind, sind nicht mit Maßnahmen vergleichbar, die – wie z. B. das Einbringen von Schwefelaerosolen in die Atmosphäre – über ihre Klimaeffekte hinaus global wirken. Im Zweifel sind globale Auswirkungen auch schwieriger zu kontrollieren als rein lokale Effekte. Allerdings können auch Maßnahmen, die sich lediglich lokal auswirken, z. B. wegen der besonderen Sensibilität des betroffenen Gebiets erhebliche Risiken bergen. Geo-Engineering-Maßnahmen sind also nicht über einen Kamm zu scheren, sondern erfordern eine differenzierte Bewertung. Eine abschließende Beurteilung der verschiedenen Geo-Engineering-Maßnahmen ist bislang auf Basis der vorhandenen Datenlage nicht möglich.

Vor diesem Hintergrund ist eine Vielzahl von Forschungsprojekten zu Geo-Engineering-Maßnahmen zu erwarten. Die Forschung wird von Modellierungen über erste Feldversuche vermutlich auch bis zu Experimenten in größerem Maßstab reichen. Essentiell ist, dass sich die Wissenschaft neben den Risiken und Nebenwirkungen von Geo-Engineering auch mit den ethisch-moralischen und gesellschaftswissenschaftlichen Implikationen auseinandersetzt. Bei großangelegten Experimenten kann die Grenze zur kommerziellen Anwendung verschwimmen. Hier sind Regelungen erforderlich, um zu vermeiden, dass kommerzielle Interessen die Ausrichtung und die Durchführung solcher Experimente beeinflussen.

Nach Prüfung des aktuellen Standes der Forschung kommt das Umweltbundesamt zu folgenden Schlüssen und Empfehlungen hinsichtlich des klimabezogenen Geo-Engineering.

- Geo-Engineering-Maßnahmen sind auf absehbare Zeit keine Alternative zu Minderung und Anpassung. Klimaschutz muss vorrangig die Ursachen des Problems, d. h. die Emission von Treibhausgasen, angehen und diese reduzieren. Daneben muss die Menschheit sich an die nicht mehr abwendbaren Folgen des Klimawandels anpassen. Entscheidender Vorteil von Minderungs- und Anpassungsmaßnahmen gegenüber dem

Geo-Engineering ist, dass nicht nur auf die Klimaeffekte reagiert wird, sondern dass auch die sonstigen Effekte von CO_2-Emissionen, z. B. die Versauerung der Meere, bekämpft werden. Klimaschutz hat zudem oft weitergehenden Nutzen: Fossile Ressourcen werden geschont oder die Luft wird mit weniger Schadstoffen belastet. Geo-Engineering hingegen, insbesondere Maßnahmen zur Beeinflussung des Strahlungshaushalts, reduzieren nachteilige Auswirkungen des Treibhausgasausstoßes nicht. Fazit: Die Schwerpunkte der Klimaforschung einschließlich der staatlichen Förderung dürfen nicht von Minderungs- und Anpassungsmaßnahmen hin zur Erforschung von Geo-Engineering-Maßnahmen verlagert werden.

- Die Industrieländer tragen hinsichtlich des Klimawandels eine besondere Verantwortung. Maßnahmen müssen daher dem Anspruch genügen, dass nicht erneut die Entwicklungsländer besondere Lasten tragen müssen. Geo-Engineering-Maßnahmen werden diesem Anspruch nicht gerecht, weil sie zum Teil erneut spezifische Risiken für die Entwicklungsländer zur Folge haben. Z. B. können Maßnahmen, die den Strahlungshaushalt beeinflussen, zu Temperaturveränderungen in Entwicklungsländern führen, die Dürren verursachen und die Sicherheit der Versorgung mit Lebensmitteln gefährden.

- Die Erforschung, Entwicklung und Erprobung der theoretischen Überlegungen zum Geo-Engineering wird sich in aller Regel noch über lange Zeiträume erstrecken. Ein zeitnaher Einsatz ist also nicht in Sicht. Die fortschreitende globale Erwärmung macht jedoch ein rasches Handeln erforderlich. Klimaschutzstrategien mit entsprechenden Minderungszielen für Treibhausgase existieren bereits, die erstens positive Effekte zum Beispiel für die Wirtschaft haben und bei denen zweitens keine gravierenden Nebenwirkungen für Mensch und Umwelt zu befürchten sind.

- Geo-Engineering-Maßnahmen sollten allenfalls als Notfalloption vorgesehen werden, um für eine Situation gerüstet zu sein, in der sich – trotz erheblicher Anstrengungen im Bereich der Minderung und Anpassung – der Klimawandel beschleunigt und daher zusätzliche Maßnahmen erforderlich sind. Die Erforschung einiger erfolgversprechender Geo-Engineering-Maßnahmen kann für eine solche Notfallsituation sinnvoll sein.

- Ein grundlegender Nachteil von Geo-Engineering Maßnahmen gegenüber Emissionsminderungsmaßnahmen besteht darin, dass nicht – wie bei Emissionsminderungsmaßnahmen – ökonomische Anreize über verschiedene Instrumente bei den Verursachern von Klimagasemissionen gesetzt werden können. Die Verursacher selbst – etwa Industrie, Energiewirtschaft, Landwirtschaft oder Verbraucher – haben bei geeigneter Gestaltung der Anreize ein Eigeninteresse, Treibhausgase zu mindern, weil sie etwa Kosten sparen, indem sie Energie sparen. Die Verursacher haben daher ein Interesse, durch Innovationen auf allen wirtschaftlichen Ebenen Kosten zu senken. Geo-Engineering-Maßnahmen – als Forschungsprojekte oder in der tatsächlichen Anwendung – werden dagegen in der Regel vom Staat finanziert und das über Jahre hinweg. Insofern handelt es sich um eine gemeinlastfinanzierte Symptombekämpfung, für die Marktmechanismen nicht zum Einsatz gebracht werden können.

- Bei der grundsätzlichen Bewertung von einzelnen Konzepten des klimabezogenen Geo-Engineering sollten die folgenden Kriterien zur Bewertung herangezogen werden:
  - Potenziale für den Klimaschutz oder die Reduzierung der Erwärmung
  - Entwicklungsstand der jeweiligen Technik
  - Kosten und Nutzen
  - Risiken, vor allem für Mensch und Umwelt, Nutzungskonflikte sowie potenzielle Synergien mit klima- oder anderen umweltpolitischen Zielen
  - Gesellschaftliche Akzeptanz und rechtliches Kontrollregime

- Die Zulassung und Anwendung von Geo-Engineering-Maßnahmen ist an den Nachweis zu binden, dass die Geo-Engineering-Maßnahme zumindest wirksam ist, d. h., dass ein positiver Beitrag zum Klimaschutz geleistet wird. In diesem Zusammenhang ist eine umfassende Energiebilanz zu erstellen, die den energetischen Aufwand für die Vorbereitung, die Durchführung der Maßnahme und die möglicherweise notwendige Rücknahme einbezieht. Ferner ist nachzuweisen, dass erhebliche nachteilige Auswirkungen auf Mensch und Umwelt ausgeschlossen sind. Nachteilige Auswirkungen sind nach dem Vorsorgegrundsatz auch dann zu vermeiden, wenn die Risiken auf Grund unsicheren Wissens nicht abschließend beurteilt werden können. Schließlich sind bei einer Entscheidung über konkrete Geo-Engineering-Maßnahmen die möglicherweise regional höchst unterschiedlichen Auswirkungen zu berücksichtigen.

- Beim Geo-Engineering zur Beeinflussung des Strahlungshaushalts besteht ein weiteres relevantes Risiko. Diese Maßnahmen verringern nicht die Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre. Die CO_2-Konzentration in der Atmosphäre würde also weiter steigen. Wenn sich in der Folge der Anwendung dieser Geo-Engineering-Maßnahmen allerdings herausstellt, dass gravierende Auswirkungen eintreten, z. B. Dürren oder Abbau stratosphärischen Ozons, müssten die Maßnahmen trotzdem fortgesetzt wer-

den. Denn anderenfalls wäre auf Grund der hohen Treihausgaskonzentrationen in der Atmosphäre eine beschleunigte Klimaerwärmung die Folge. Je nach Höhe der CO_2-Konzentrationen könnten katastrophale Auswirkungen eintreten. Im Grundsatz gilt daher für Maßnahmen der Beeinflussung des Strahlungshaushalts: Ein „Zurück“ bedeutet die Hinnahme der fortgesetzten Klimaerwärmung – und zwar stärker als zuvor – mit all ihren negativen Folgen für Mensch und Umwelt.

- Schon die Erforschung und Erprobung von Geo-Engineering-Maßnahmen muss einer staatlichen Kontrolle unterliegen, da einige Geo-Engineering-Maßnahmen mit erheblichen Risiken verbunden sind; teilweise sind irreversible Umweltveränderungen oder -schäden zu befürchten und die Risiken daher kaum beherrschbar. Im Vorfeld sind die Risiken der einzelnen Forschungsaktivitäten zu ermitteln und zu bewerten. Voraussetzung für die Zulassung der Erforschung oder Erprobung ist, dass erhebliche Risiken für Mensch und Umwelt ausgeschlossen sind. In der Regel sollte eine Begleitforschung hinsichtlich potenzieller Risiken obligatorisch sein.

- Die rechtlichen Vorgaben auf internationaler Ebene steuern derzeit die Erforschung, Erprobung und Durchführung von Geo-Engineering-Maßnahmen nur unzureichend. Verursacht ist das durch den Umstand, dass die Idee des Geo-Engineering nicht bekannt war, als die Normen geschaffen wurden. Es bedarf daher der Entwicklung eines geeigneten Rechtsrahmens. Zu prüfen ist, ob entsprechende Regelungen in einem eigenen, neu zu etablierenden Regime oder unter der Ägide der Klimarahmenkonvention oder der jeweils spezialisierten Übereinkommen entwickelt werden sollen. Um den Aufwand und die Komplexität der Fragestellungen begrenzt zu halten, scheint es eher sinnvoll, Lösungen im Rahmen der spezialisierten Übereinkommen anzustreben.

- In jedem Fall ist durch die neuen Regelungen sicherzustellen, dass vor der Durchführung entsprechender Geo-Engineering-Maßnahmen die möglicherweise betroffenen Staaten informiert und konsultiert werden. Unabgestimmte unilaterale Maßnahmen sollten durch die internationalen Vorgaben untersagt werden.

07

LITERATUR

Aznar, C., Lindgren, K., Larson, E. & Möllersten, K. (2006):
Carbon capture and storage from fossil fuels and biomass – costs and potential role in stabilizing the atmosphere. Climatic Change, Volume 74, Numbers 1-3 / Januar 2006, S. 47-79.

Akbari, H., Menon, S. & Rosenfeld, A. (2009):
Global cooling: increasing world-wide urban albedos to offset CO_2. Climatic Change 94, S. 275-286.

Birnie, P., Boyle, A. & Redgwell, C. (2009):
International law & the environment. Oxford University Press, Oxford and New York, S. 137-189.

Bodansky, D. (1996):
May we engineer the climate? Climatic Change 33, S. 315-316.

Borel, B. (2008):
Cleaning up CO_2 with a twist of lime. Cosmos Magazin. http://www.cosmosmagazine.com/node/2117

Caldeira, K. & Rau, G. H. (2000):
Accelerating carbonate dissolution to sequester carbon dioxide in the ocean: geochemical implications. Geophysical Research Letters. Band 27, Ausgabe 2, S. 225-228.

Canadell, J. G. & Raupach, M. R. (2008):
Managing forests for climate change mitigation. Science 320, S. 1456-1457.

CBD (2009):
Scientific synthesis of the impact of ocean fertilization on marine biodiversity. Montreal, Technical Series No. 45, 53 S.

Chisholm, S. W. (2000):
Stirring times in the Southern Ocean. Nature, Band 407, S. 685.

Chisholm, S.W., Falkowski, P.G., Cullen, J.J. (2001):
Dis-crediting ocean fertilization. Science, Band 294, S. 309-310.

Graf Vitzthum, W. (2010a):
Völkerrecht. De Gruyter, S. 413.

Graf Vitzthum, W. (2010b):
Völkerrecht. De Gruyter, S. 586-587.

Güssow, K., Proelss, A., Oschlies, A., Rehdanz, K., Rickels, W. (2010):
Ocean iron fertilization: Why further research is needed. Marine Policy. In Press.

Hamwey, R. (2007):
Active amplification of the terrestrial albedo to mitigate climate change: an exploratory study. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change 12, 4, S. 419-439.

Harris, N. R. P., Ancellet, G., Bishop, L., Hofmann, D. J., Kerr, J. B., McPeters, R. D., Prendez, M., Randel, W., Staehelin, J., Subbaraya, B. H., Volz-Thomas, A., Zawodny, J. & Zerefos, C. S. (1997):
Trends in stratospheric and free tropospheric ozone. Journal of Geophysical Research 102, S. 1571-1590.

IEA (2010):
CO_2 Emissions from Fuel Combustion 2010, http://www.worldenergy-outlook.org/

IPCC (2005):
Carbon Dioxide Capture and Storage. Metz, B., Davidson, O., De Co-ninck, H., Loos, M. & Meyer, L. (Hrsg.)

IPCC (2007a):
Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon, S.D., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquie, M., Averyt, K. B., Tignor, M. & Miller, H. L. (Hrsg.). Cambridge University Press: Cambridge and New York.

IPCC (2007b):
Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Metz, B., Davidson, O. R., Bosch, P. R., Dave, R. & Meyer, L. A. (Hrsg.). Cambridge University Press: Cambridge.

Johnston, P., Santillo, D., Stringer, R. (1999):
Ocean disposal / sequestration of carbon dioxide from fossil fuel production and use: an overview of rationale, techniques and implications. Greenpeace International. 51 S.

Keith, D. W. & Dowlatabadi, H. (1992):
Taking Geo-Engineering seriously. Eos, Transactions American Geophysical Union 73, S. 289-293.

Keith, D. W. (2001):
Geo-Engineering. Nature, Band 409, S. 420.

Keith, D.W., Ha-Dong, M., Stolaroff, J. K. (2006):
Climate Strategy with CO_2 Capture from the Air. Climatic Change, Volume 74, Numbers 1-3, S. 17-45.

Keith, D. W.(2009):
Why Capture CO_2 from the Atmosphere? Science, Vol. 325 No. 5948, S. 1654-1655.

Kelemen, P. B. & Matter, J. (2008):
In situ mineral carbonation in peridotite for CO_2 storage. Proceedings of the National Academy of Sciences. Band 105, S. 17295-17300.

Kheshgi, H. S. (1995):
Sequestering atmospheric carbon dioxide by increasing ocean alkalinity. Energy, Band 20, Ausgabe 9, S. 915-922

Konstantinov, E. (1990):
International treaties and ecological protection from activities in outer space. Böckstiegel (Hrsg.), Environmental Aspects of Activities in Outer Space, Köln, Berlin, Bonn und München, S. 140.

Körtzinger, A. (2010):
Der anthropogene Kohlenstoffkreislauf im Anthropozän. Chemie in unserer Zeit. Band 44. S. 118-129

Kruger, T. (2010):
Increasing the alkalinity of the ocean to enhance its capacity to act as a carbon sink and to counteract the effect of ocean acidification. GeoCanada 2010- Working with the Earth. 4 Seiten. www.geocanada2010.ca/uploads/abstracts_new/view.php?item_id=1067.

Lampitt, R. S., Achterberg, E. P., Anderson, T. R., Hughes, J. A., Iglesias-Rodriguez, M. D., Kelly-Gerreyn, B. A., Lucas, M., Popova, E. E., Sanders, R., Shepherd, J. G., Smythe-Wright, D.& Yool, A. (2008):
Ocean fertilization: a potential means of Geo-Engineering? Philosophical Transactions of the Royal Society A, Band 366, S. 3919-3945.

Latham, J., Rasch, P., Chen, C. C., Kettles, L., Gadian, A., Gettelman, A., Morrison, H., Bower, K. & Choularton, T. (2008):
Global temperature stabilization via controlled albedo enhancement of low-level maritime clouds. Philosophical Transaction of the Royal Society A 366, S. 3969-3987.

Lehmann, J., Gaunt, J. & Rondon, M. (2006):
Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems—a review. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change 11, S. 403-427.

Lenton, T. M. & Watson, A. J. (2000):
Redfield revisited. 1. Regulation of nitrate, phosphate, and oxygen in the ocean. Global Biogeochemical Cycles, Band 14 (1), S. 225-248.

Lenton, T.M. & Vaughan, N. E. (2009):
The radiative forcing potential of different climate Geo-Engineering options. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions 9, S. 2559-2608.

Leujak, W., Ginzky, H., Arle, J., Claussen, U. (2010):
Erdabkühlung durch Eisendüngung der Ozeane. In: Die Klima-Manipulateure. Rettet uns Politik oder Geo-Engineering? Hrsg. G. Altner, H. Leitschuh, G. Michelsen, U.E. Simonis, E.U. von Weizsäcker; Jahrbuch Ökologie 2011; S. Hirzel Verlag Stuttgart, S. 40-49.

Lovelock, J. E. & Rapley, C.G. (2007):
Ocean pipes could help the earth to cure itself. Nature, Band 449, S. 403.

MacCracken, M. C. (2009):
Beyond mitigation – potential options for counter-balancing the climatic and environmental consequences of the rising concentrations of greenhouse gases. Policy Research Working paper 4938, The World Bank, 43 S.

Maurmann, D. (2008):
Rechtsgrundsätze des Völkerrechts am Beispiel des Vorsorgeprinzips. Nomos-Verlag, 267 S.

Meinshausen, M., Meinshausen, N., Hare, W., Raper, S., Frieler K., Knutti, R., Frame, D., Allen, M. (2009):
Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2° C. Nature 458, S. 1158-1162.

Nellemann, C., Corcoran, E,;
Duarte, C. M., Valdes, L., De Young, C., Fonseca, L. & Grimsditch, G. (Hrsg.) (2009): Blue Carbon – The role of healthy oceans in binding carbon. A rapid response assessment. United Nations Environment Programme, GRID-Arendal.

NOAA (2009):
The NOAA Annual Greenhouse Gas Index (AGGI). http://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/

Rasch, P. J., Tilmes, S., Turco, R. P., Robock, A., Oman, L., Chen, C. C., Stenchikov, L. & Garcia, R. R. (2008):
An overview of Geo-Engineering of climate using stratospheric sulphate aerosols. Philosophical Transactions of the Royal Society A 366, S. 4007-4037.

Rau, G. H. & Caldeira, K. (1999):
Enhanced carbonate dissolution: a means of sequestering waste CO_2 as ocean bicarbonate. Energy Conversion and Management. Band 40, S. 1803-1813.

Rau, G. H., Caldeira, K., Knauss, K. G., Downs, B. & Sarv, H. (2001):
Enhanced carbonate dissolution as a mean of capturing and sequestering carbon dioxide. First National Conference on Carbon Sequestration, Washington D.C., May 2001. 7 S.

Reynolds, J. (April 18, 2011):
The Regulation of Climate Engineering Research. Available at SSRN: http://ssrn.com/abstract=1813965.

Robock, A. & Mao, J. (1995):
The volcanic signal in surface temperature observations. Journal of Climate 8, S. 1086-1103.

Robock, A., Oman, L. & Stenchikov, G. L. (2008):
Regional climate responses to Geo-Engineering with tropical and Arctic SO2 injections. Journal of Geophysical Research 113, D16101. doi: 10.1029/2008JD010050.

Sands, P. (2003):
Principles of International Environmental Law. Vol. I, Frameworks, Standards and Implementation, 2 edition, Edinburgh: Cambridge Univ. Press, S. 266-279.

Shaw, M. N. (2009):
International Law. 6. Edition, Cambridge Univ. Press, S. 780.

The Royal Society - Shepherd, J., Caldeira, K., Cox, P., Haigh, J., Keith, D., Launder, B., Mace, G., MacKerron, G., Pyle, J., Rayner, S., Redgwell, C. & Watson, A. (2009):
Geo-Engineering the Climate: Science, Governance and Uncertainty. London, 83 S.

Trick, C.G., Bill, B.D., Cochlan, W.P., Wells, M.L., Trainer, V.L., Pickell, L.D. (2010):
Iron enrichment stimulates toxic diatom production in high-nitrate, low-chlorophyll areas. Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS). Online-Publikation vor dem Druck 15. März 2010, doi: 10.1073/pnas.0910579107 http://www.pnas.org/content/early /2010/02/24/0910579107.full.pdf+html

Schuiling, R. D. & Krijgsman, P. (2006):
Enhanced weathering: An effective and cheap tool to sequester CO_2. Climate Change 74, S. 349-354.

Shepherd, J., Iglesias-Rodriguez, D. & Yool, A. (2007):
Geo-engineering might cause, not cure, problems. Nature, Band 449, S. 781.

Strand, S.E., Benford, G. (2009):
Ocean sequestration of crop residue carbon: recycling fossil fuel carbon back to deep sediments. Environmental Science and Technology. Band 43, Ausgabe 4, S. 1000-1006.

Strong, A., Chisholm, S., Miller; C. & Cullen, J. (2009):
Ocean fertilization: time to move on. Nature, Band 461, S. 347-348.

Trenberth, K. E. & Dai, A. (2007):
Effects of Mount Pinatubo volcanic eruption on the hydrological cycle as an analog of Geo-Engineering. Geophysical Research Letters 34, L15702. doi: 10.1029/2007GL030524.

Trumper, K., Bertzky, M., Dickson, B., van der Heijden, G., Jenkins, M., Manning, P., June, P. (2009):
The natural fix? The role of ecosystems in climate mitigation. A UNEP response assessment. United Nations Environment Programme, UNEP-WCMC; Cambridge, UK, 66 S.

UBA (2009a):
CCS – Rahmenbedingungen des Umweltschutzes für eine sich entwickelnde Technik. Autoren: Becker, R., Boehringer, A., Charisse, T., Frauenstein, J., Gagelmann, F., Ginzky, H., Hummel, H., Karschunke, K., Lipsius, K., Lohse, C., Marty, M., Müschen, K., Schäfer, L., Sternkopf, R. & Werner, K. Dessau-Roßlau.

UBA (2009b):
Klimaänderung. Wichtige Erkenntnisse aus dem 4. Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen der Vereinten Nationen (IPCC). Autor: Mäder, C.

UBA (2009c):
Konzeption des Umweltbundesamtes zur Klimapolitik. Notwendige Weichenstellungen 2009. Autoren: Knoche, G., Lünenbürger, B., Hain, B., Müschen, K. Dessau-Roßlau

UBA (2010):
Energieziel 2050: 100 % Strom aus erneuerbaren Quellen. Autoren: Klaus T., Vollmer, C., Werner, K., Lehmann, H., Müschen, K. Dessau-Roßlau

UBA (2010a):
Abfälle im Meer – ein gravierendes ökologisches, ökonomisches und ästhetisches Problem. Hintergrundpapier (http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/3900.html)

Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen, WBGU (2008):
„Welt im Wandel: Zukunftsfähige Bioenergie und nachhaltige Landnutzung." WBGU, Berlin, 388 S.

Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen, WBGU (1999):
„Welt im Wandel – Strategien zur Bewältigung globaler Umweltrisiken" - WBGU, Berlin, 378 S.

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, WI (2010): RECCS plus:
Regenerative Energien (RE) im Vergleich mit CO_2-Abtrennung und -Ablagerung (CCS) – Update und Erweiterung der RECCS-Studie 0329967/07000285, Berlin, 240 S. http://www.wupperinst.org/uploads/tx_wiprojekt/RECCSplus_Endbericht.pdf

WWF (2009):
Modell Deutschland – Klimaschutz bis 2050. Vom Ziel her denken. http://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/pdf_neu/WWF_Modell_Dutschland_Endbericht.pdf

Yool, A., Sheperd, J.G., Bryden, H.L. & Oschlies, A. (2009):
Low efficiency of nutrient translocation for enhancing oceanic uptake of carbon dioxide. Journal of Geophysical Research, Band 114, doi: 10.1029/2008JC004837.

Zhou, S. & Flynn, P. C. (2005):
Geo-Engineering downwelling ocean currents: a cost assessment. Climatic Change, Band 71, S. 203-220.

IMPRESSUM

Herausgeber:
Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1, 06844 Dessau-Roßlau
Telefon: 0340 / 2103 - 0
E-Mail: info@umweltbundesamt.de
Internet: www.umweltbundesamt.de
www.fuer-mensch-und-umwelt.de

Autoren:
Harald Ginzky, Friederike Herrmann,
Karin Kartschall, Wera Leujak,
Kai Lipsius, Claudia Mäder,
Sylvia Schwermer, Georg Straube

Unter Mitarbeit von:
Rosemarie Benndorf, Evelyn Giese,
Reinhard Herbener, Juliane Berger,
Johannes Norpoth

Redaktion:
Harald Ginzky, Friederike Herrmann,
Karin Kartschall, Claudia Mäder

Gestaltung:
Studio GOOD, Berlin
www.studio-good.de

Auflage:
3.000 Exemplare
Gedruckt auf Recycling-Papier mit dem Blauen Engel.

Stand: April 2011







Diese Publikation ist Teil der
Öffentlichkeitsarbeit des Umweltbundesamtes.
Sie ist kostenlos zu beziehen bei:
GVP | Postfach 30 03 61 | 53183 Bonn
Service-Telefon: 0340 21 03 - 66 88
Service-Fax: 0340 21 03 - 66 88
E-Mail: uba@broschuerenversand.de

Der Bericht steht auch im Internet als
PDF-Dokument zum Download bereit:
www.uba.de/uba-info-medien/3978.html

Fotonachweis:
S. 3 U.S. National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA Photo Library
S. 26 Alfred-Wegener-Institut / Algenblüte vor Irland (Foto: ESA)
S. 34 National Aeronautics and Space Administration (NASA)
S. 35 National Aeronautics and Space Administration (NASA)